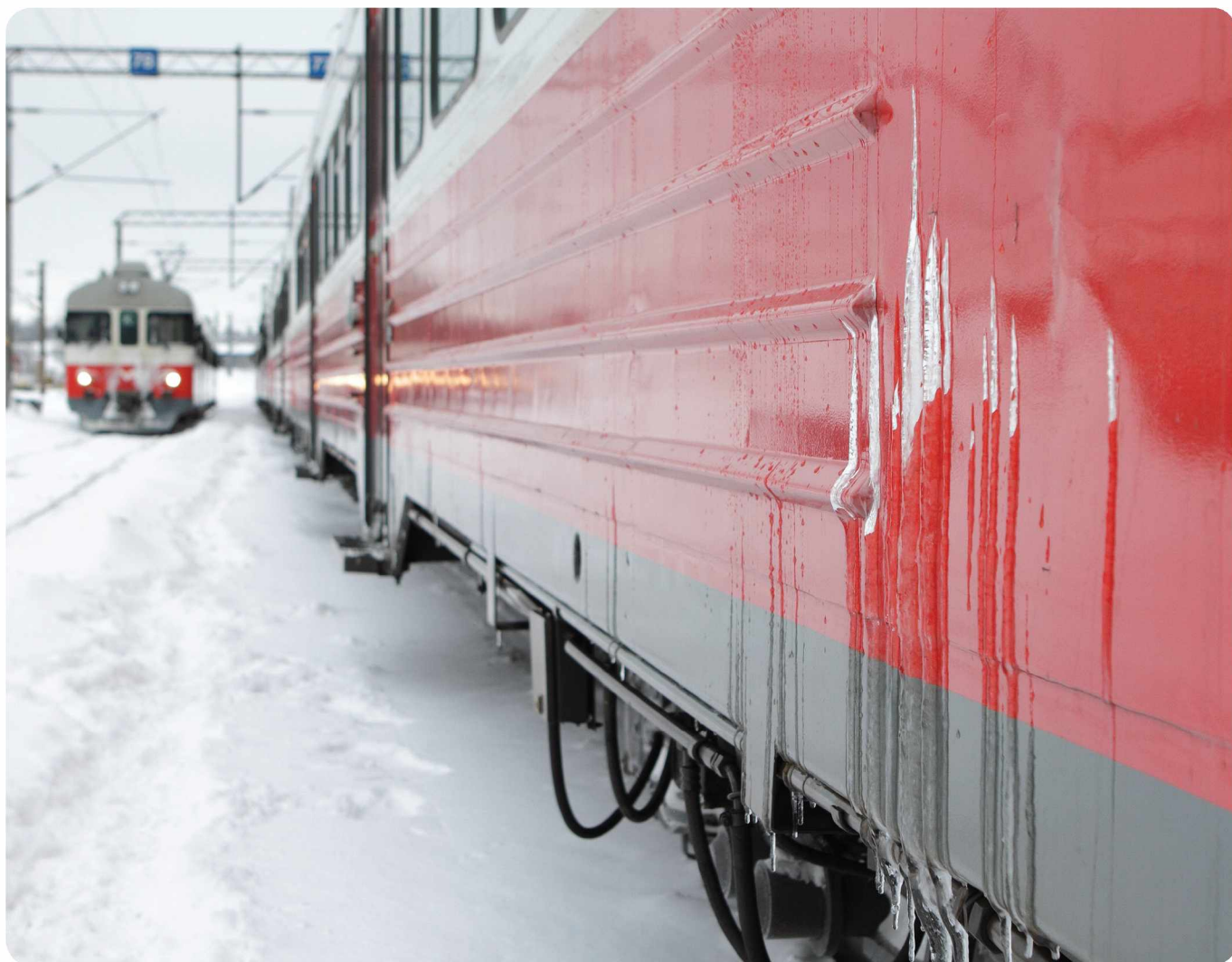


JARNO JUNNIKKALA  
JONNE UNTINEN

## Lumen ja jään kertymisen estäminen





Jarno Junnikkala, Jonne Untinen

# Lumen ja jään kertymisen estäminen

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 10/2013

Liikennevirasto

Helsinki 2013

*Kannen kuva: Risto Laine*

Verkkojulkaisu pdf ([www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi))

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-264-8

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3887



**Jarno Junnikkala ja Jonne Untinen: Lumen ja jään kertymisen estäminen.** Liikennevirasto, väylätekniikkaosasto. Helsinki 2013. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 10/2013. 58 sivua ja 16 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-264-8.

**Avainsanat:** lumi, jää, adheesiovoima, liikkuva kalusto, rautatievaihde

## Tiivistelmä

Lumen ja jään kertyminen on ongelma useilla eri liikennemuotoihin liittyvillä osa-alueilla. Sillä on myös moninaiset vaikutukset muihin yhteiskunnan perustoimintoihin. Lumi ja jää vaikeuttavat kaikkien liikennöintimuotojen, rautatieliikenteestä lento-liikenteeseen, operointia talvikuukausina. Rautatieliikenteessä ongelmat korostuvat erityisesti runsaslumisina talvina, kuten 2009–2010 ja 2010–2011, jolloin runsaat saateet ja alhaiset lämpötilat tuottivat paljon ongelmia liikkuvalla kalustolle ja ratainfrastruktuurille, kun sääilmiöt aiheuttivat kalustovikoja ja tukkivat rautatievaihteita. Vaihteiden toiminta voi estyä myös kalustosta irronneen lumen ja jään seurauksena, jos ne putoavat vaihdealueella syntyvien herätteiden seurauksena epäsuotuisessa paikassa. Lumen tarttumisen estäminen tai vähentäminen kalustoon vähentäisi runsaasti talvikuukausiin liittyviä rautaliikenteen ongelmia.

Tutkimustyön teoriaosassa käsitellään lumen fysikaalisia ominaisuuksia, kiinnittymistä eri materiaaleihin ja lumen ja jään aiheuttamia ongelmia kalustolle ja rautatievaihteille. Tutkimusosassa esitellään käytetyt tutkimusmenetelmät, koejärjestelyt, valitut koemateriaalit ja niiden valintaperusteet. Tutkimusosassa käsitellään myös pinnoitemateriaaleille suoritettut kaksi koetta, joista ensimmäisellä selvitetään, estävätkö ne lumen tarttumista ja toisella, alentavatko ne lumen ja teräksen välistä adheesiota.

Tutkimustulosten mukaan testatut pinnoitteet eivät estä lumen tarttumista teräkseen. Osa pinnoitteista hidasti lumen kertymistä testin kriittisen ensimmäisen minuutin aikana, mutta tulokset olivat lähellä testin mittausepävarmuutta ja erot pinnoittamattomaan vertailuteräkseen olivat pieniä. Vastaavasti useat pinnoitteet alensivat teräksen ja lumen välistä adheesiota, jolloin lumi irtosi koekappaleesta huomattavasti aiemmin kuin pinnoittamattomasta vertailuteräksestä ja tyypillisesti useassa osassa. Toisaalta osalla pinnoitteista tulokset olivat pinnoittamatonta terästä huonommat. Tulosten mukaan pinnoitteet vaikuttivat merkittävästi adheesiovoimiin rajapinnassa, mutta myös lumen sisäisiin koheesiovoimiin kertymisen eri vaiheissa.

**Jarno Junnikkala och Jonne Untinen: Anhopningen av snö och is.** Trafikverket, infrastrukturteknik. Helsingfors 2013. Trafikverkets undersökningar och utredningar 10/2013. 58 sidor och 16 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-264-8.

**Nyckelord:** snö, is, adhesionskraft, rörlig materiel, järnvägsväxel

## Sammanfattning

Anhopningen av snö och is är ett problem på många delområden i anknytning till olika trafikformer, men inverkar också på andra basfunktioner i samhället. Snö och is försvårar verksamheten för alla trafikformer, från järnvägs- till flygtrafik, under vintermånaderna. I järnvägstrafiken framträder problemen särskilt under snörika vintrar, såsom 2009–2010 och 2010–2011, då den rikliga nederbörden och de låga temperaturerna orsakade stora problem för den rörliga materielen och baninfrastrukturen. Detta ledde till fel i materielen och blockerade järnvägsväxlar. Växlarnas funktion kan också förhindras av snö och is som lossnar från materielen, om de faller på ogynnsamma platser på växlingsområdet. Om man kunde förhindra att snö fastnar i materielen eller minska den mängd som fastnar, skulle problemen för järnvägstrafiken minska betydligt under vintermånaderna.

I studiens teoridel behandlas snöns fysikaliska egenskaper, hur den fastnar i olika slags material samt de problem som snö och is orsakar materielen och järnvägsväxlarna. I undersökningsdelen presenteras använda undersökningsmetoder, testarrangemang, valda testmaterial och motiveringarna till valen. I undersökningsdelen behandlas också de två tester som gjorts med beläggningssmaterial, där man i det första testet tog reda på om de förhindrar att snö fastnar och i det andra om de minskar adhesionen mellan snö och stål.

Enligt undersökningsresultaten förhindrar inte de testade beläggningssmaterialen snön från att fastna i stålet. En del av beläggningarna gör att snön anhopas långsammare under testets första, kritiska minut, men resultaten var nära testets mätningssosäkerheten och skillnaderna till icke belagt jämförelsestål var små. På motsvarande sätt minskade många av beläggningarna adhesionen mellan stål och snö, vilket gjorde att snön lossnade från teststycket betydligt tidigare än från det icke belagda jämförelsestålet och typiskt i flera delar. Å andra sidan var resultaten för en del av beläggningarna sämre än för icke belagt stål. Enligt resultaten har beläggningarna stor verkan på adhesionskraften i gränsskikten, men också på snöns interna kohesionskrafter i olika faser av anhopningen.

**Jarno Junnikkala and Jonne Untinen: Snow and ice build-up.** Finnish Transport Agency, Infrastructure technology. Helsinki 2013. Research reports of the Finnish Transport Agency 10/2013. 58 pages and 16 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-264-8.

**Keywords:** snow, ice, adhesion, rolling stock, railway switch

## Summary

Snow and ice build-up is a problem in most transport and traffic sectors but also in everyday society. Snow and ice makes transportation, especially in railroad, during winter seasons difficult. Outstandingly heavy snow fall winters, such as the 2009–2010 and 2010–2011 winters, accentuate the problems caused by the snow, where the weather phenomenon causes faults for rolling stock and railway switches. Railway switches can malfunction due to dropped snow and ice from the rolling stock undercarriage. Railway switches cause impacts on the undercarriage and trucks that can remove snow and ice from the rolling stock. Preventing or reducing snow and ice build-up could reduce the problems.

In the theory part of this study the physical properties of snow and ice, adhesion to different materials and the problems that adhering snow and ice causes to rolling stock and switches are examined. The used research methods, testing arrangements, the selected coating materials and the reasons for their selection are also discussed. In the research part of this work the two tests, the fast test and the adhesion test, are explained in detail.

The test results show that the selected coatings won't prevent snow from adhering to the test pieces. Some of the coatings slowed the adhering of the snow during the first minute of the test, but the decrease of the speed of snow adhering was minor and close to the uncertainty level of the experiments. In the second test many coatings reduced the adhesion of the snow and the snow dropped from the test piece with less mass than the mass needed to break snow off from bare steel. With the lowest masses it was also observed that the snow dropped in two sections from the test piece. Some of the coatings performed worse than bare steel and actually snow accumulated more on them than on bare steel. Based on the results the different coatings affected highly on the adhesion strength and also on the cohesive strength of the snow.

## Alkusanat

Tämän tutkimuksen ovat tehneet Liikenneviraston tilauksesta projektitutkijat dipl.ins. Jarno Junnikkala ja dipl.ins. Jonne Untinen Oulun yliopiston Konetekniikan osastolta.

Työn valvojina ovat toimineet Liikenneviraston ylitarkastaja, dipl.ins. Ville-Pekka Lilja ja Oulun yliopiston Auto- ja työkonetekniikan prof., dos., TkT Mauri Haataja. Koejärjestelyissä avusti Oulun yliopiston Konetekniikan osaston Teknillisen mekaniikan laboratorion laboratorioteknikko Kalle Vähätaini.

Helsingissä kesäkuussa 2013

Liikennevirasto

Väylätekniikkaosasto

# Sisällysluettelo

ALKUSANAT .....	6
1 JOHDANTO .....	9
2 LUMEN FYSIKAALISET OMINAISUUDET JA KIINNITTYMINEN RAKENTEISIIN.....	10
2.1 Lumen fysikaaliset ominaisuudet.....	10
2.2 Kiinnittyminen rakenteisiin .....	13
3 LUMEN AIHEUTTAMAT ONGELMAT .....	16
3.1 Liikkuva kalusto .....	16
3.2 Rautatievaihteet .....	18
4 KOEMATERIAALIT JA VALINTAPERUSTEET .....	19
4.1 Koekappaleiden yleiset spesifikaatiot.....	20
4.2 Nanopohjaiset pinnoitteet.....	20
4.3 Kylmäkeraamit .....	20
4.4 Tekniset muovit .....	20
4.5 Silikonit .....	21
5 KOKEELLISET MENETELMÄT .....	23
5.1 Koelaboratorio ja tutkimuslaitteisto.....	23
5.2 Testisuorituksen kuvaus .....	30
5.3 Testi 1: Pinnoitteen vaikutus lumen kertymisnopeuteen .....	31
5.4 Testi 2: Pinnoitteen vaikutus lumen ja pinnan väliseen adheesioon .....	32
6 KOETULOKSET .....	34
6.1 Testi 1 .....	34
6.1.1 R-pinnoitteet .....	35
6.1.2 M-pinnoitteet .....	35
6.1.3 N-pinnoite.....	36
6.1.4 A-pinnoitteet.....	37
6.2 Testi 2 .....	37
6.2.1 A-pinnoitteet.....	40
6.2.2 M-pinnoitteet .....	43
6.2.3 N-pinnoite.....	47
6.2.4 R-pinnoitteet.....	48
7 KOETULOSTEN ANALYSOINTI .....	52
7.1 Testi 1: tulosten analysointi.....	52
7.2 Testi 2: tulosten analysointi .....	53
8 YHTEENVETO.....	56
9 JATKOTUTKIMUKSET .....	57

## LIITTEET

Liite 1	Koekappaleen spesifikaatiot pinnoitevalmistajille
Liite 2	Alu-Releco Oy:n pinnoitteiden spesifikaatiot ja pinnoitusmenetelmän kuvaus
Liite 3	Testi 2 pinnoittamattomalle teräkselle
Liite 4	Testi 2 pinnoitteella A2
Liite 5	Testi 2 pinnoitteella A3
Liite 6	Testi 2 pinnoitteella A5
Liite 7	Testi 2 pinnoitteella A7
Liite 8	Testi 2 pinnoitteella M1
Liite 9	Testi 2 pinnoitteella M3
Liite 10	Testi 2 pinnoitteella M6
Liite 11	Testi 2 pinnoitteella M9
Liite 12	Testi 2 pinnoitteella N
Liite 13	Testi 2 pinnoitteella R4
Liite 14	Testi 2 pinnoitteella R5
Liite 15	Testi 2 pinnoitteella R8
Liite 16	Testi 2 pinnoitteella R10

# 1 Johdanto

Tässä työssä tutkitaan erilaisten pinnoitteiden vaikutusta lumen kertymisnopeuteen ja lumen adheesiovoimaan. Lumen kertyminen junan alustarakenteisiin aiheuttaa haittaa liikenteen sujuvuudelle. Vaihteiden aiheuttamat herätteet irrottavat junan alustarakenteista lunta ja jäätä, mikä voi estää vaihteiden toiminnan putoamalla vaihteen kiskon ja kielen väliin. Vaihteiden sulatusvastusten teho on yleensä riittämätön sulattamaan pudonnutta lunta ja jäätä, jolloin ainoa keino palauttaa vaihteen toiminta on käydä poistamassa lumi ja jää manuaalisesti. Lisäksi junien alustassa oleva lumi saattaa aiheuttaa toimintahäiriöitä tai jopa vahingoittaa alustan rakenteita.

Paras pinnoite olisi sellainen, joka estää lumen ja jään tarttumisen kokonaan junan alustarakenteisiin. Toinen vaihtoehto olisi sellainen pinnoite, joka vähentää lumen ja jään adheesiota merkittävästi niin, että lumi tippuisi sen oman massan aiheuttamasta kuormasta johtuen jo hyvin pienillä herätevoimilla, joita syntyy mm. junan kiihdytyksissä ja jarrutuksissa. Alempi adheesio nopeuttaa myös liikkuvan kaluston alustan sulatusta.

Testattavia pinnoitetyyppejä oli neljä kappaletta: nanopohjaiset, kylmäkeraamit, tekniset muovit ja silikonit. Kaikista muista pinnoitetyypeistä paitsi silikonista oli useampia eri vaihtoehtoja testattavana.

Mittaukset tehtiin Oulun yliopiston Konetekniikan osaston Konelaboratorion kylmähuoneessa. Kylmähuoneeseen rakennettiin lumitykki, jolla voitiin suihkuttaa lunta koekappaleisiin. Mittauksien tiedon tallentamista varten rakennettiin myös tarvittavat anturoinnit ja tiedonkeruulaitteistot. Testejä suoritettiin kaksi erilaista:

- testi 1: nopea testi, missä mitattiin lumen kertymisnopeus,
- testi 2: adheesiotesti, missä mitattiin massa, jolla lumi tippui koekappaleesta.

## 2 Lumen fysikaaliset ominaisuudet ja kiinnittyminen rakenteisiin

Lumen kertyminen johtuu lumen ja tartuntapinnan välisestä adheesiivisesta voimasta ja lumipartikkeleiden välisistä koheesiovoimista. Lumen ja jään kiinnittyminen eli adheesiolujuus on leikkauslujuutta lumen tai jään ja rakenteen välillä. Kun rakenteen pinta on peittynyt lumeen, lumen kertymisen mahdollistavat lumipartikkeleiden väliset koheesiovoimat. Koheesiovoima kuvaa materiaalin sisäisten sidosten lujuutta. Lumen kertymisen estämiseksi on näin ollen oleellista alentaa adheesiovoimia rajapinnassa, koska lähtökohtaisesti tiedetään, että teräksen ja lumen välinen adheesiovoima on riittävän suuri, jotta lumi voi tarttua voimakkaasti teräksen pintaan kiinni. Rajapintojen välinen adheesiovoima riippuu useasta lumeen, materiaaleihin ja rakenteisiin liittyvästä tekijästä. Vallitsevat ympäristötekijät määräävät lumen ominaisuudet, kuten kidemuodon ja tiheyden. Vastaavasti tartuntapinnan ominaisuudet, kuten pinnankarheus- ja muoto vaikuttavat.

Junakaluston kannalta ongelmallista on vastasatanut, kevyt ja kuiva pölyävä lumi, joka nousee junan ilmapirran nostattamana ilmaan ja tarttuu alapuolisiin rakenteisiin kiinni. Lumipartikkeleiden ja junan suuresta nopeuserosta johtuen lumi sintrautuu kiinteäksi massaksi, josta muodostuu lämpötilanvaihteluiden seurauksena jäätä. Lähtökohtaisesti ongelmana on siis alhaisen tiheyden omaava kevyt lumi, joka aikanaan aiheuttaa ongelmia kehittyessään tiheäksi lumi- ja jäämassaksi, irtoaa liikkuvasta kalustosta ja estää rautatievaihteen toiminnan.

### 2.1 Lumen fysikaaliset ominaisuudet

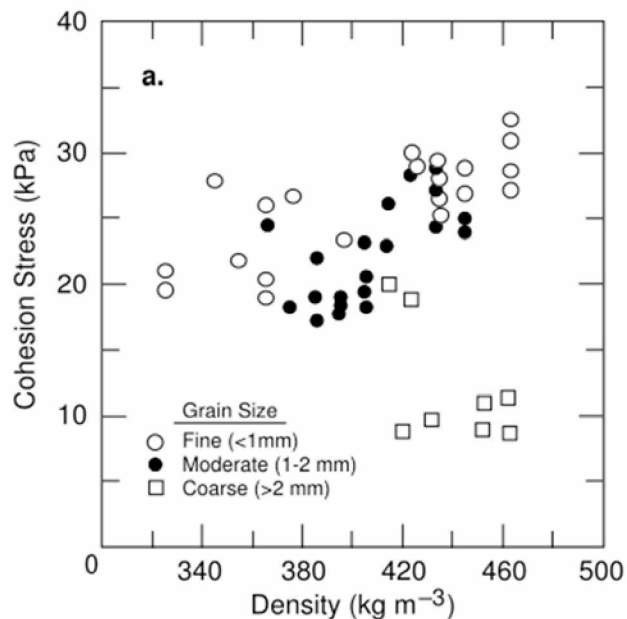
Lumi ja lumikiteet ovat jäätä, mutta avoimesta kiderakenteesta johtuen lumen kaikki lujuusominaisuudet ovat jäätä heikommat. Lumikiteiden muoto ja koko vaihtelevat suuresti ympäristötekijöistä riippuen. Lumen tiheyden määrittää kolme tekijää: lumipartikkeleiden ominaisuudet, lujuuskehittyminen ajan suhteen ja ympäristön lämpötila. Vastaavasti lumen lujuusominaisuudet määräytyvät pitkälti tiheyden perusteella, sillä tiheyden kasvaessa lumikiteiden välisten sidosten määrä lisääntyy. (Oksanen 1999)

Vastasataneen lumen tiheys vaihtelee ympäristöolosuhteiden, pääasiassa tuulen nopeuden ja ilmanlämpötilan mukaan ollen  $10\text{--}300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ . Tiheyden on mitattu kasvavan  $6,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  yhden asteen lämpötilannousua kohden. Alhaisen tiheyden omaavaa kevyttä lunta sataa tyynellä säällä ja kireällä pakkasella. Tällöin lumen tiheys voi olla alhaisimmillaan  $10 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  ja puhutaan puuterilumesta. Talven aikana lumipeite saavuttaa Suomessa maksimitiheyden  $300\text{--}400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ . Kun tiheys on yli  $800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ , aletaan puhua lumijäästä ja jäästä. (Oksanen 1999, Rasmus 2005)

Koheesio kuvaa materiaalin sisäisten sidosten lujuutta, eli lumipartikkeleiden ja -kiteiden välisiä voimia. Koheesiovoimaan vaikuttavat lumen vesipitoisuus sekä kiteiden ja partikkeleiden muoto ja sidosten määrä, eli lumen tiheys. Alhaisen tiheyden omaavalla kuivalla lumella on täten myös alhainen koheesio. Lumen ollessa riit-

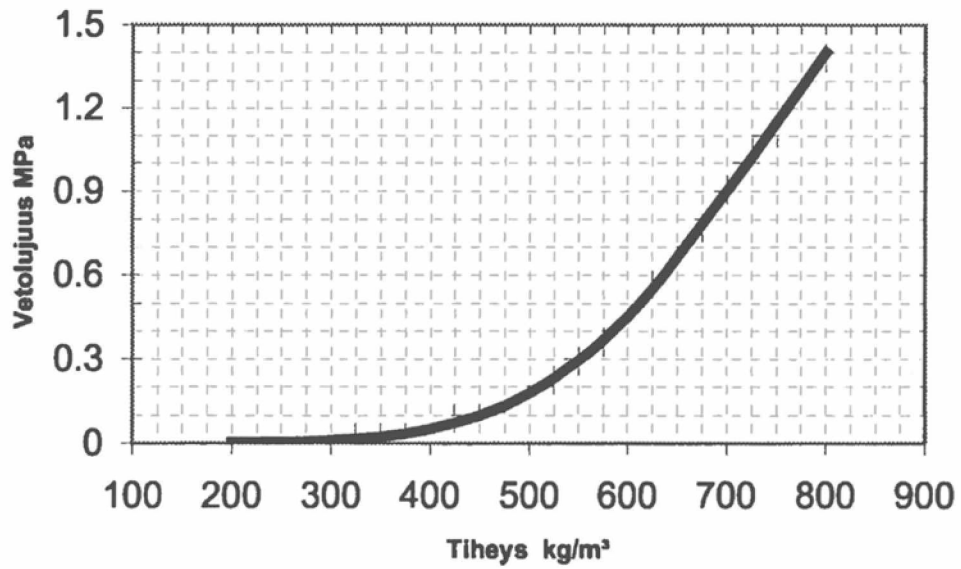


tävään märkää se menettää koheesionsa ja lujuusominaisuutensa, koska sidokset sulavat. Kun vesipitoisuus (veden tilavuusosuus) on 8 %, lumen lujuusominaisuudet alkavat heikentyä ja pitoisuuden ylittäessä 15 % lumi muuttuu erittäin vetiseksi. Kuvasta 1 havaitaan, että koheesiovoiman suuruuteen vaikuttaa lumen tiheys (sidosten määrä), mutta ennen kaikkea lumipartikkeleiden koko. Hienolla partikkelikoolla (<1 mm) koheesiovoima on noin 18–33 kPa, keskimääräisellä (1–2 mm) noin 15–30 kPa ja karkealla (>2 mm) noin 10 kPa. Tiheyden kasvaminen lisää sidosten määrää ja koheesiolujuutta, minkä voi myös todeta kuvaajasta. (Rasmus 2005, Shapiro et al. 1997)

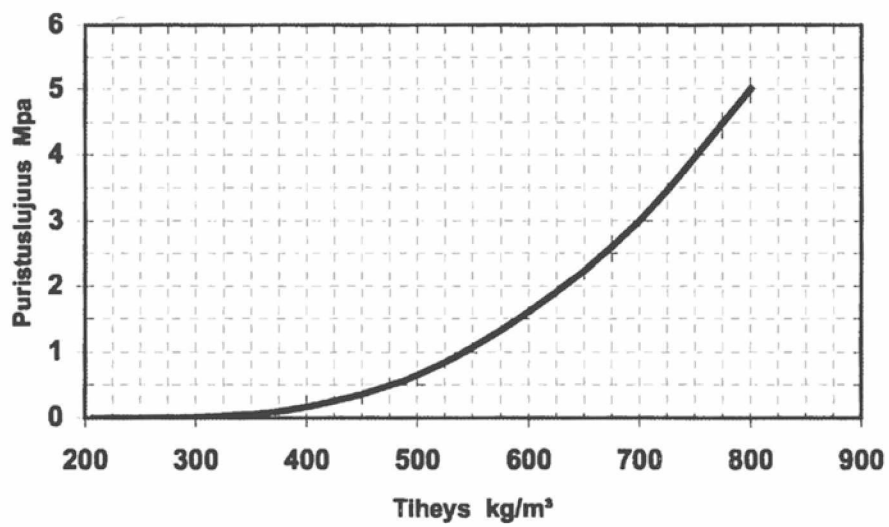


Kuva 1. Lumen koheesiovoima tiheyden funktiona. Merkit kuvaavat partikkelikokoa. (Shapiro et al. 1997)

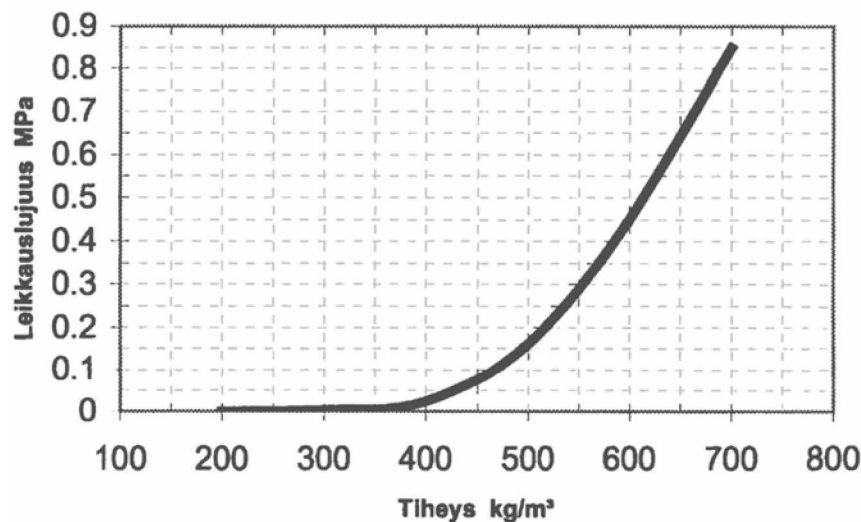
Lumen lujuusominaisuuksiin vaikuttavat siis useat eri tekijät, joten myös mitatut lujuusarvot vaihtelevat lähteestä riippuen. Lumirakenteiden suunnittelu- ja rakentamisoheissa lujuusarvot on määritetty tiheyden mukaan (kuvat 2–4). Kuvaajista on nähtävissä, että lumi alkaa saada lujuusominaisuuksia vasta, kun tiheys ylittää  $300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ .



Kuva 2. Lumen vetolujuus [MPa] tiheyden [kg/m³] funktiona. (RIL 2001)



Kuva 3. Lumen puristuslujuus [MPa] tiheyden [kg/m³] funktiona. (RIL 2001)

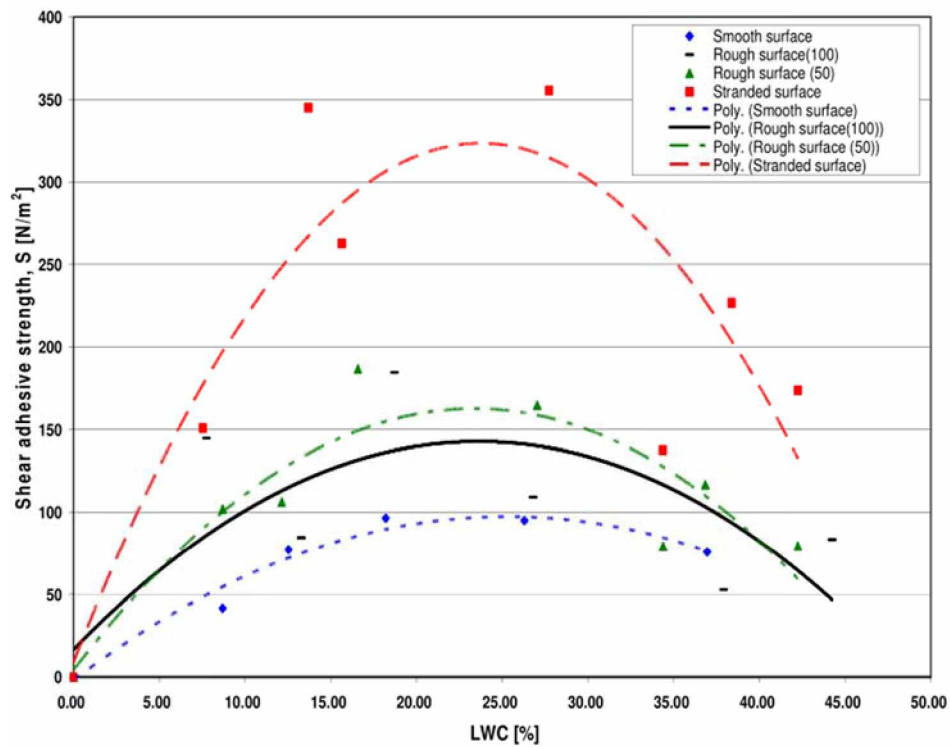


Kuva 4. Lumen leikkauslujuus [MPa] tiheyden [ $\text{kg/m}^3$ ] funktiona. (RIL 2001)

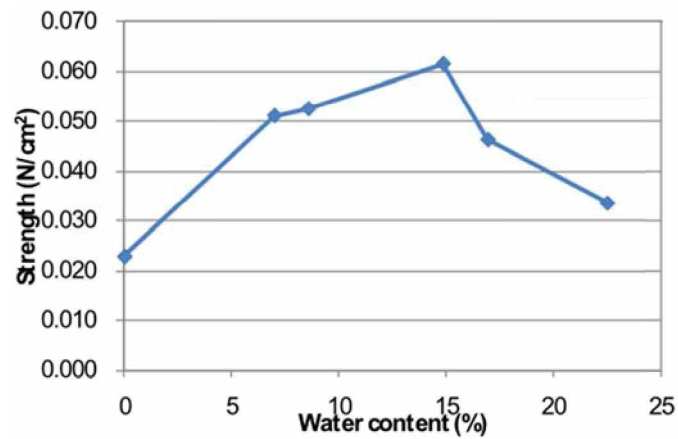
## 2.2 Kiinnittyminen rakenteisiin

Jään ja lumen sisäiset koheesiovoimat ovat pienemmät kuin adheesiolujuus metalleihin. Tällöin sisäiset sidokset pettävät ennen murtumista rajapinnasta. Jotta lumen tarttumista rakenteisiin voitaisiin estää, tulisi adheesiolujuutta siis alentaa merkittävästi materiaaliominaisuuksilla. Lumen adheesiolujuutta eri materiaaleihin on vaikea määrittää tarkasti, koska useilla tekijöillä on vaikutuksena mittaustulokseen ja tutkimusta on tehty rajoitetusti. Jellinekin (1960) mukaan lumijään adheesiolujuus teräkseen on 0,086–0,134 MPa, Hefny et al. (2009) mukaan lumen ja alumiiniin välinen adheesiovoima on riippuvainen mm. lumen vesipitoisuudesta, materiaalin pinnankarheudesta ja -muodosta vaihdellen välillä 0,04–0,36 kPa, kun vesipitoisuus on 5–45 % (kuva 5). Sakakibara et al. (2007) mukaan lumen adheesiovoima polyeteeniin on verrannollinen vesipitoisuuteen, adheesiovoima on 0,023–0,062 kPa vesipitoisuuden arvoilla 0–23 %. Lumen ja materiaalin välinen adheesiovoima kasvaa siis tiettyyn kriittiseen vesipitoisuuden arvoon asti (noin 15–20 %), jonka jälkeen adheesiovoima alkaa pienentyä (kuvat 5 ja 6). Toisin sanoen kuivan ja sulamispisteessä olevan lumen adheesiovoimat ovat alhaiset.

Kuivan lumen ja eri materiaalien välisiä vetolujuuksia on myös tutkittu eri muuttujilla (taulukko 1). Kyseisessä kokeessa lasille, selluloosa-asetaatille ja alumiinille mitattiin suuria vetolujuuden arvoja. Vastaavasti silikonikumin ja lumen välillä mitattiin kohtalaisen alhainen vetolujuus. Teflonin ja vinyylin vetolujuus lumeen oli niin alhainen, ettei sitä voitu mitata. Vastaavasti adhesiivinen tai osittain adhesiivinen ja koheesiivinen murtuminen tapahtui ainoastaan Teflonilla ja vinyylillä aineiden rajapinnassa, muilla materiaaleilla tapahtui kohesiivinen murtuminen rajapinnan läheisyydessä. Tutkimuksen mukaan lumen ja koemateriaalin rajapintaan muodostuu jääsidos, jonka kehittyminen riippuu koemateriaalin pintaenergiasta. (Mizuno & Wakahama 1983)



Kuva 5. Adheesiovoima [N/m<sup>2</sup>] lumen ja alumiinin välillä vesipitoisuuden [%] funktiona eri pinnankarheuksilla. (Hefny et al. 2009)



Kuva 6. Adheesiovoima [N/cm<sup>2</sup>] polyeteenin ja lumen välillä vesipitoisuuden [%] funktiona. (Sakakibara et al. 2007)

Taulukko 1. Lumen vetolujuus [kPa] eri materiaaleihin. (Mizuno &amp; Wakahama 1983)

Lämpötila: -10 °C				Lämpötila: -5 °C		
Materiaali	Kontaktiaika	Vanhenemisaika	Vetolujuus	Kontaktiaika	Vanhenemisaika	Vetolujuus
	[min]	[min]	[kPa]	[min]	[min]	[kPa]
Lasi	10	20	2,25	10	10	4,00
	10	10	1,60			
	5	10	0,82			
	30	30	8,00			
Selluloosa- asettaatti	5	20	1,22	10	10	2,90
	30	30	2,38			
Alumiini	10	20	2,30	10	10	0,55
	30	30	2,60			
Akryylimuovi (PMMA)	10	20	0,95	10	10	2,30
	5	20	0,61			
	16 tuntia		5,75			
Silikonikumi	30	30	0,54	10	10	0,50
	10	20	0,50			
Teflon	30	30	0	30	30	0
Vinyyli	30	30	0	30	30	0

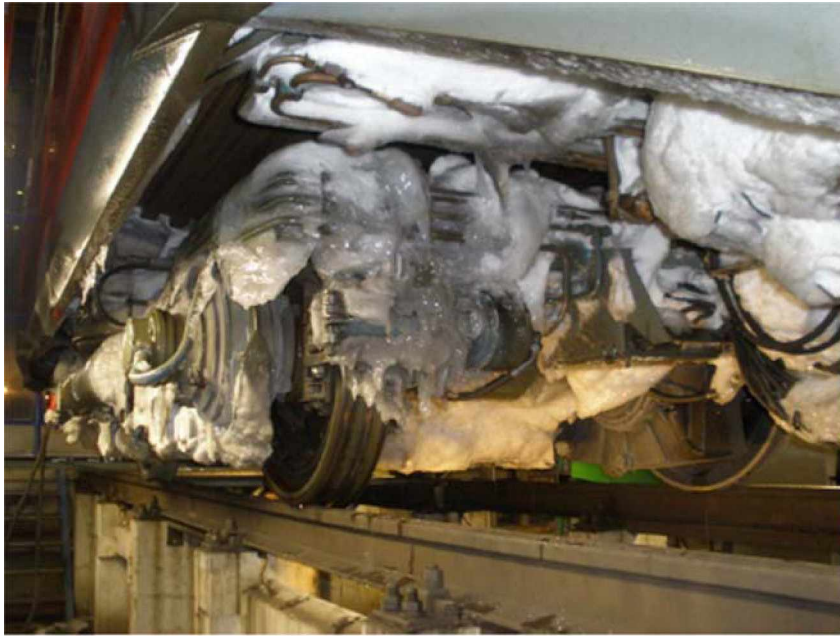
### 3 Lumen aiheuttamat ongelmat

Lumi ja jää tuottavat ratainfrastruktuurille ja liikkuvalle kalustolle paljon ongelmia, joista seuraa liikennehaittoja ja täsmällinen rautatieliikennöinti vaikeutuu. Liikkuvalle kalustolle ongelmana on erityisesti alustarakenteisiin ja vaunujen väleihin kertyvä lumi, josta muodostuu lämpötilanvaihteluiden seurauksena jäätä. Ratainfrastruktuuriin lumi vaikuttaa eniten vaihteissa, joihin satava ja tuulen mukana tuiskuava lumi pakkautuu. Lisäksi vaihdealueiden liikkuvaan kalustoon aiheuttamat herätteet irrottavat lunta ja jäätä, jotka voivat pudota epäsuotuisiin paikkoihin ja estää vaihteen toiminnan

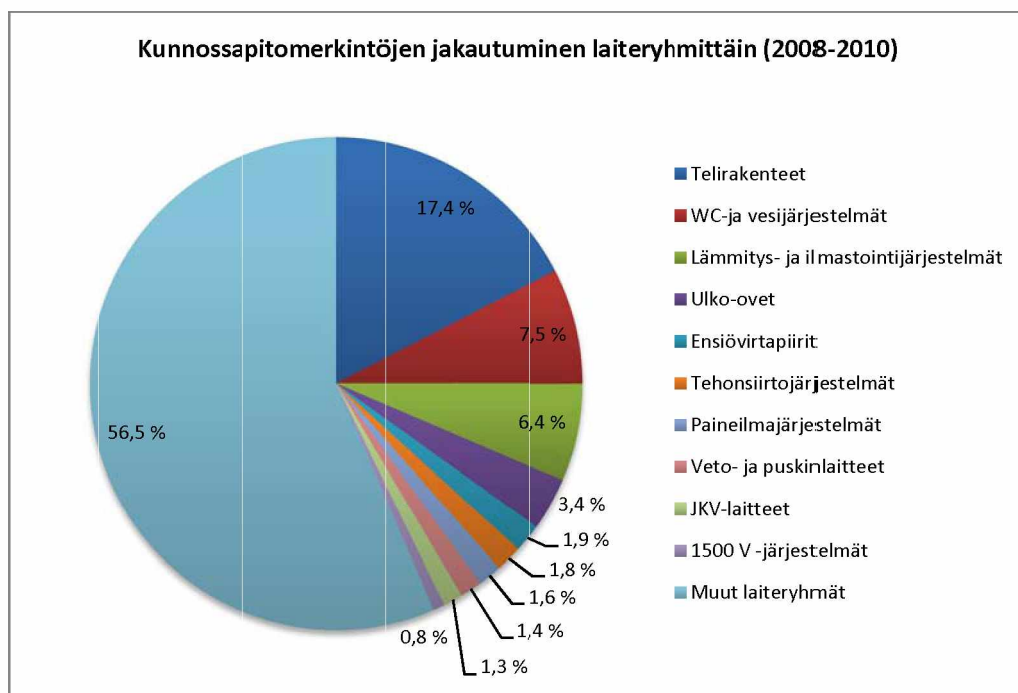
#### 3.1 Liikkuva kalusto

Junakaluston monimutkaiset alusrakenteet tarjoavat lumelle otollisia pintoja ja muotoja, joihin kerääntyä. Ahtaat raot, monimutkaiset pinnanmuodot ja materiaalien suuri pinnankarheus edesauttavat lumen kiinnittymistä. Pintojen tai pinnoitteiden alhainen pinnankarheus alentaa rajapintojen välistä adheesiovoimaa. Käsittlemättömän ja kiillotetun teräspinnan välinen ero voi tässä suhteessa olla moninkertainen, esimerkkinä kuva 5.

Liikkuvan kaluston telirakenteet ovat jatkuvassa vuorovaikutuksessa ympäröivien talviolosuhteiden, kuten pöllyävän lumen kanssa, enemmän kuin muut rakenteet. Teli on suojaamaton rakenne, johon lumi ja jää voi kertyä esteettä, joten komponentit joutuvat kovalle rasitukselle. Liikkuvan kaluston teknisiin vikoihin liittyvä suurin yksittäinen kokonaisuus on telirakenne ja sen alijärjestelmät, kuten jarru- ja jousitusjärjestelmät. Osa vioista on luonnollisesti seurausta esimerkiksi komponenttien elinkaaren päättymisestä tai muista mekaanisista syistä, mutta vikojen kehittymisessä on selkeää vuodenaikaista vaihtelua, mikä on osaltaan seurausta kalustoon kertyneestä lumesta, jäädästä ja alhaisista ilmanlämpötiloista (kuva 7). Kalustolajista riippuen telirakenteeseen liittyvien vikojen osuus kaikista vioista on vajaa neljännes (kuva 8), yhdistettynä vikojen voimakkaaseen vuodenaikaiseen vaihteluun. Myös muissa kuvan 8 laiteryhmissä esiintyi vastaavaa vaihtelua tyypillisesti talvikuukausina. Lumen ja jään kiinnittyminen ja kertyminen kaluston rakenteisiin tuottaa siis paitsi ensisijaisesti kalusto-ongelmia, myös toissijaisia vaikutuksia ratainfrastruktuuriin, kunnossapitoyksiköille ja ennen kaikkea vaikeuttaa täsmällistä rautatieliikennöintiä. (Junnikkala 2011)



Kuva 7. Sm2-sähkömoottorijunan alustarakenteisiin kertynyttä lunta ja jäätä. (Liikennevirasto 2010)



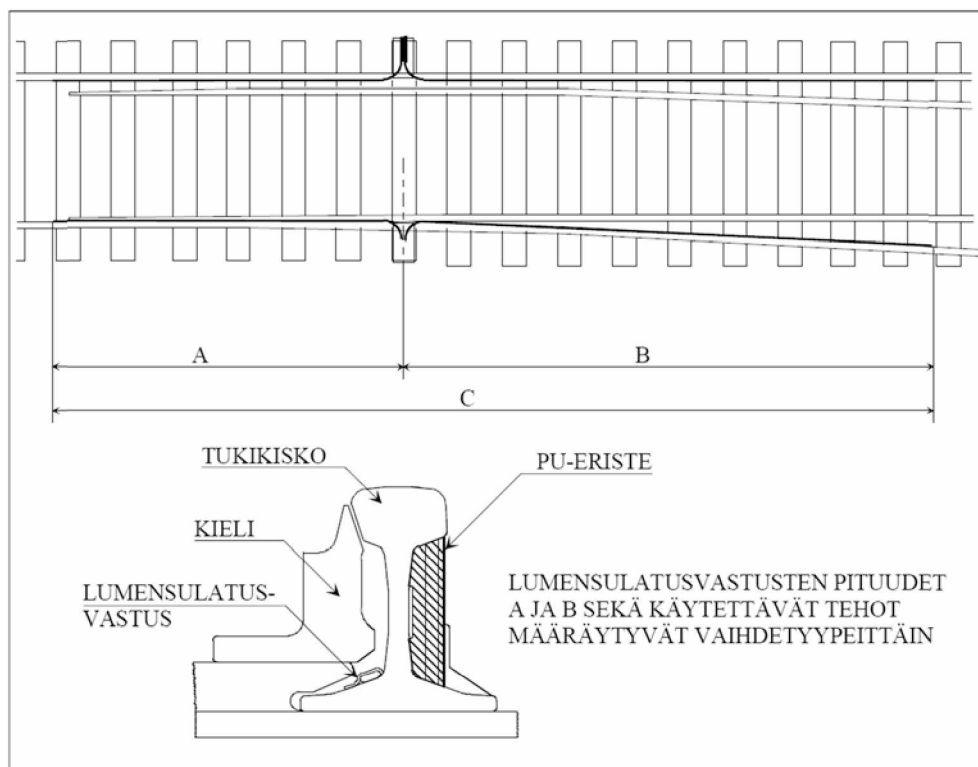
Kuva 8. Henkilöliikennekaluston laiteryhmiä kunnossapitomerkintöjen jakautuminen. (Junnikkala 2011)

## 3.2 Rautatievaihteet

Liikkuvan kaluston rakenteissa voi lunta ja jäätä olla kertyneenä tonneittain. Epäselvää kuitenkin on, mistä kaluston osista lumi ja jää esimerkiksi rautatievaihteissa tarkalleen ottaen irtoavat ja putoavat radalle. Syytä on kuitenkin olettaa, että telirakenne ja telikehys ovat sellaisia kohteita, joissa on paljon lunta ja jäätä ja joihin kohdistuu suurimmat rataherätteet. Lumen irtoamiseen voi vaikuttaa myös telikomponenteista, kuten levyjarruista, tuleva hukkalämpö. Toinen potentiaalinen kohde on vaunujen välit, joihin pölyyävää lunta myös pakkautuu runsaasti, joka voi irrota junan pituussuuntaisten voimien seurauksena.

Lumi- ja jäämassan pudotessa kalustosta vaihtealueella se voi päätyä vaihteen kielen ja tukikiskon väliin, jolloin vaihteen oikea toiminta estyy. Vaihteessa voi olla lämmitysjärjestelmä, mutta järjestelmän lämmitysteho ei ole riittävä sulattamaan tiivistä lumi- ja jäämassaa lyhyessä ajassa, joka ei välttämättä ole kosketuksessa lämmityselementtiin. Tästä seuraa liikenteellisiä häiriöitä, kunnes vaihde on mekaanisesti puhdistettu. Lumen ja jään kertymisen estämisellä kaluston alustarakenteisiin on siis myös tärkeitä ratainfrastruktuuriin vaikuttavia välillisiä vaikutuksia.

Vaihteet on varustettu lämmitysjärjestelmillä ensisijaisesti lumisateen ja tuulen mukana kulkeutuvan lumen sulattamiseksi (kuva 9). Tuulen kuljettama lumi on ongelmallista, koska se kerääntyy kiskoja vasten ja tiivistyy tuulen vaikutuksesta. Vastaa- vasti kuten junasta irtoavan lumen tapauksessa, tuulen tiivistämä lumimassa voidaan joutua poistamaan mekaanisesti, jos se vaikuttaa vaihteen toimintaan. Tuulen kuljet- taman lumen päätymistä vaihteeseen pyritään estämään mm. erilaisten lumiharjasten ja -spoilereiden avulla.



Kuva 9. Lumensulatusvastukset tukikiskoissa. (Liikennevirasto 2012)



## 4 Koemateriaalit ja valintaperusteet

Lumen ja erityisesti jään kertymisen estäminen on pitkään ollut tutkimuskohteena, koska niiden kertyminen on epäsuotuisa ilmiö lukuisissa sovelluksissa. Ongelmaan ei myöskään toistaiseksi ole pystytty kehittämään toimivaa ratkaisua, joka luotettavasti ja toistettavasti pystyisi ilmiötä estämään. Parhaiten menestynyt ratkaisu on ollut veden jäätympistettä alentavien kemikaalien, kuten propyleeniglykolin käyttö mm. lentokoneissa ja junissa, mutta niidenkin käyttöön liittyy runsaasti haittapuolia. Kemikaalien ohella potentiaalinen menetelmä lumen ja jään kertymisen estämiseksi on alentaa rajapintojen välistä adheesiovoimaa, kuten teoriaosassa esiteltiin. Ideaalinen pinnoiteaine estäisi lumen ja jään muodostumisen täysin, mutta toistaiseksi tällaista materiaalia ei tunneta. Sen sijaan pinnoiteaineilla tyypillisesti pystytään alentamaan adheesiovoimaa, jolloin lumen ja jään poistaminen on helpompaa, koska irtoaminen vaatii vähemmän voimaa. (USACE 2006)

Koemateriaalien kartoituksessa keskityttiin löytämään potentiaalisimmat materiaali-vaihtoehdot, joilla lumen ja teräksen välistä adheesiovoimaa pystytään joko alentamaan niin paljon, ettei lumen kertymistä tapahdu, tai adheesiovoima alenee lumen sisäisten koheesiovoimien tasolle tai alapuolelle, jolloin lumi irtoaa helposti omalla painollaan. Tämä oli materiaalivalinnassa ensisijainen vaatimus. Toissijaisilla, epäsuotuisillakaan ominaisuuksilla ei ole tutkimuksen tässä vaiheessa suurta painoarvoa tilanteissa (pl. esim. erittäin voimakas korroosio), joissa materiaali pystyisi kokonaan estämään lumen kertymisen, sillä kyseessä olisi jo tällöin merkittävä tulos. Sen sijaan materiaaleille, jotka eivät estä lumen kertymistä, mutta alentavat adheesiovoimaa, voi lisävaatimuksia asettaa, koska materiaalikirjo on suhteellisen laaja. Vaatimuksia ovat mm. hyvä kulutuskestävyys, pysyvyys, helppo käytettävyys, ympäristöystävällisyys ja ne eivät saa aiheuttaa korroosiota.

Markkinoilla on kirjallisuuden perusteella joitain kaupallisia pinnoitteita, maaleja ja muita materiaaleja, jotka mainostavat alhaisia kitkaominaisuuksia, hydrofobisuutta ja jopa jääfobisuutta. Materiaalien saatavuus on kuitenkin huono, erityisesti Suomessa. Lisäksi useita materiaaleja on jo testattu tutkimuksissa kokeellisin menetelmin (joskin jäällä), joten niiden hankkimista ei katsottu tarpeelliseksi ominaisuuksien puolesta, lukuun ottamatta NuSil Technologyn tuotetta, joka pärjasi poikkeuksetta kokeissa parhaiten.

Materiaalivalinnassa keskityttiin erityisesti kotimaisten yritysten tarjoamiin pinnoite-vaihtoehtoihin, koska materiaalien valikoima, ominaisuudet ja saatavuus olivat hyviä ja yritykset yhteistyöhaluisia. Selvitystyön perusteella päädyttiin kolmen kotimaisen ja yhden ulkomaisen valmistajan pinnoitteisiin. Millidyne Oy toimitti tutkimuskäyttöön kahdeksan nanopohjaista pinnoitevaihtoehtoa, Oy Akijan Ab seitsemän kylmäkeraamipinnoitetta ja Alu-Releco Oy kymmenen muovipinnoitetta. NuSil Silicone Technology:n silikonipohjainen pinnoiteaine oli potentiaalisin ulkomainen vaihtoehto. Kaikkiaan mittauksiin saatiin siis mukaan 26 erilaista pinnoitetta.

## 4.1 Koekappaleiden yleiset spesifikaatiot

Mittauksissa käytettävien koekappaleiden tuli olla mahdollisimman tasalaatuisia luotettavien ja vertailukelpoisten koetulosten aikaansaamiseksi, joten valmistajille laadittiin ohje kuvaamaan pinnoitettavien koekappaleiden ominaisuuksia. Spesifikaatiot on esitetty liitteessä 1. Pinnoitettavan levyn kooksi määrättiin 400x400x1 mm (pituus, leveys, ainepaksuus) ja materiaaliksi tavallinen rakenneteräs. Pinnankarheudeksi määrättiin tavallisen valssatun teräksen  $R_a$ -arvo, joka on tyypillisesti 0,5–2,0  $\mu\text{m}$ , ellei pinnoitusmenetelmä muuta vaadi. Pintavirheitä, kuten painaumia, kolhuja tai muita vaurioita ei saanut olla, eikä koekappaletta saanut kiillottaa. Pinnoitus oli tehtävä kappaleen molemmille puolille. Koekappaleiden nurkissa oli oltava reiät kiinnitystä varten ja yhdessä nurkassa valmistajan tunnuskirjain sekä juokseva numero pinnoitevaihtoehdon mukaan.

## 4.2 Nanopohjaiset pinnoitteet

Millidyne Oy toimitti testiin kahdeksan nanopohjaista pinnoitetta. Teräslevyt oli pinnoitettu käyttämällä pensseliä ja telaa. Pinnoitteen pinnanlaadussa oli tarkoituksellista vaihtelua, kuten myös pinnoitteen paksuudessa. Kerrospaksuudet vaihtelivat 30–70  $\mu\text{m}$  välillä. Pinnoitetut koekappaleet olivat kuivuneet huoneenlämmössä. Koekappaleista käytetään merkintöjä M1–M9 (koekappaletta merkinnällä M5 ei ollut).

## 4.3 Kylmäkeraamit

Oy Akijan Ab:n toimittamat kylmäkeraamit ovat pinnoitteita, joilla käsiteltävä pinta voidaan esimerkiksi ruiskuttaa tai sivellä. Kylmäkeraameilla on hyvä lämmönkestävyys, kemiallinen kesto ja alhainen kitka. Käyttölämpötila keraameilla on erittäin laaja, alhaisista lämpötiloista aina 1000 °C asti. Pinnoitekerros on ohut, noin 10–25  $\mu\text{m}$  ja värejä on useita. Koekappaleista käytetään merkintöjä A1–A7.

## 4.4 Tekniset muovit

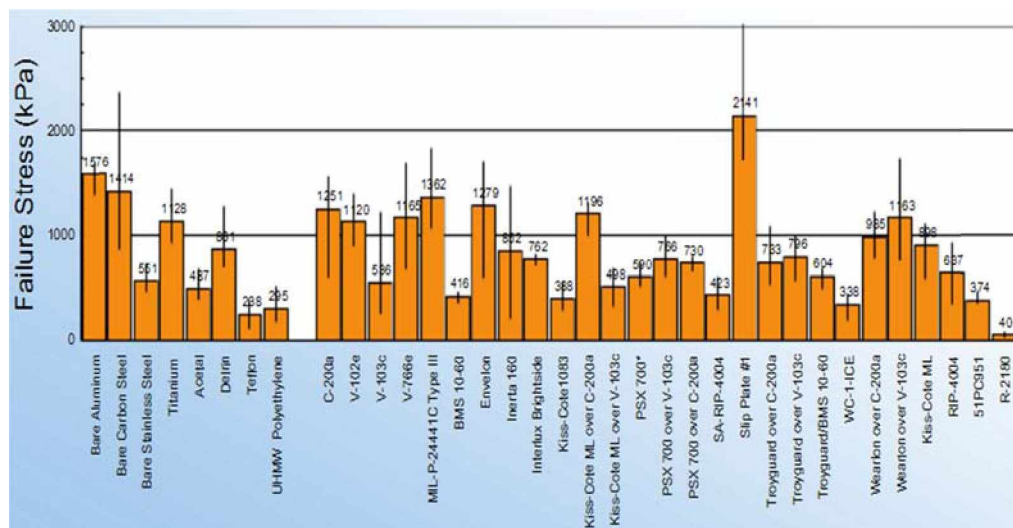
Alu-Relecon pintakäsittelyistä valmistaja valitsi 10 erilaista fluorimuovipinnoitetta. Pinnoitteista erityisesti PTFE on tunnettu alhaisesta kitkakertoimestaan ja sillä on monia sovelluksia eri teollisuudenaloilla, myös koneenrakennuksessa. Valmistajan toimittamien koemateriaalien spesifikaatiot on esitetty liitteessä 2, josta ilmenevät pinnoitetyyppi, valmistuslämpötila ja pinnoitepaksuus. Myös valmistusmenetelmä on kuvattu. Pinnoittaminen vaatii lämpökäsittelyjä pinnoitettavalle kappaleelle, lukuun ottamatta pinnoitetta R10, joka voidaan ruiskuttaa huoneenlämmössä. Koekappaleista käytetään merkintöjä R1–R10.

PTFE on hydrofobinen materiaali, joka hylkii vettä ja vesipohjaisia ainesosia. PTFE:n on useissa tutkimuksissa mitattu alentavan jään tai lumen adheesiovoimaa ja vetolujuutta verrattuna käsittelemättömiin metalleihin (taulukko 1 ja kuva 10). Esimerkiksi kuvan 10 kokeessa jään adheesiolujuuden arvoksi on mitattu 288 kPa, mikä on lähes viisi kertaa vähemmän kuin teräksellä (1414 kPa). (USACE 2006)

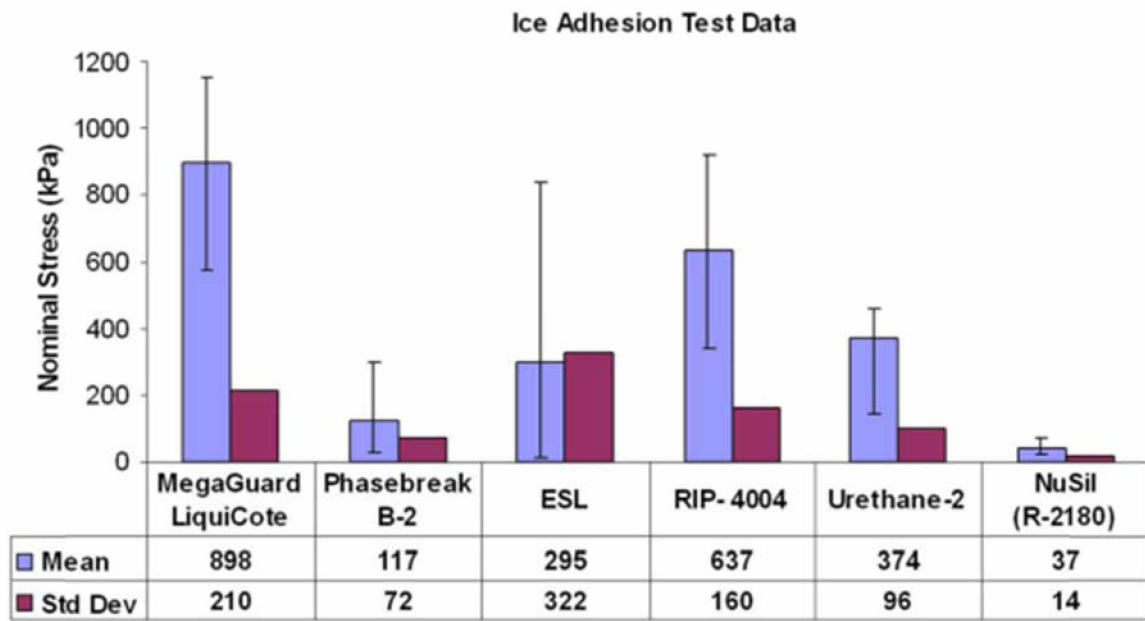
## 4.5 Silikonit

Silikoneilla on hyvin erilaiset ominaisuudet verrattuna luonnonkumiin, sillä ne pysyvät elastisina alhaisissakin lämpötiloissa ja sietävät myös korkeita lämpötiloja. Useilla silikoneilla ns. lasittuspiste on alle  $-115\text{ }^{\circ}\text{C}$ :ta. Muita silikonien ominaisuuksia ovat mm. alhainen kimmokerroin, hyvä kosteudenkesto ja pieni sähkönjohtavuus. NuSil Silicone Technology R-2180:n on kokeellisin menetelmin todettu alentavan jään adheesiolujuutta pinnoittamattomaan teräkseen ja alumiiniin verrattuna ja on näissä kokeissa ollut paras pinnoiteaine (kuvat 10 ja 11). Jään adheesiolujuudeksi R-2180-pinnoitteeseen mitattiin 37–40 kPa, mikä oli noin 35 kertaa vähemmän kuin käsittelemättömällä teräksellä. Lumen adheesiolujuutta ei kokeissa ole mitattu. (Summer et al. 2004, USACE 2006).

NuSil R-2180 on kaksikomponenttinen, silikonipohjainen ja jääfobinen pinnoiteaine. Pinnoitus tapahtuu sekoittamalla ensin silikonin ja liuotinosat (ksyleeni) keskenään. Ohjearvo sekoitussuhteelle on 1:1, mutta viskositeettia voi muuttaa haluamukseen liuottimen määrä vaihtelemalla. Pinnoitettavan kappaleen voi kastaa pinnoiteaineeseen, tai esimerkiksi ruiskuttaa tai sivellä pinnoitusaine kappaleen pintaan. Kuivumisaika riippuu sekoitussuhteesta, ainepaksuudesta, ilmanlämpötilasta ja -kosteudesta. Kokeita varten teräslevy pinnoitettiin sekoitussuhteella 1:2 (yksi osa silikonin, kaksi osaa liuotinta), jolloin viskositeetti oli sopiva teräslevyn kastamiseksi ja pinnoitteesta saatiin tasalaatuinen. Ohjeen mukainen kuivumisaika normaalissa huonelämpötilassa on useita tunteja. Kokeita varten pinnoitteen annettiin kuivua useita päiviä.



Kuva 10. Jään adheesiolujuus eri materiaaleilla ja pinnoitteilla. Pylvään korkeus ja numeroarvo kuvaavat keskimääräistä adheesiovoimaa, pystyviiva tulosten vaihteluväliä. (USACE 2006)



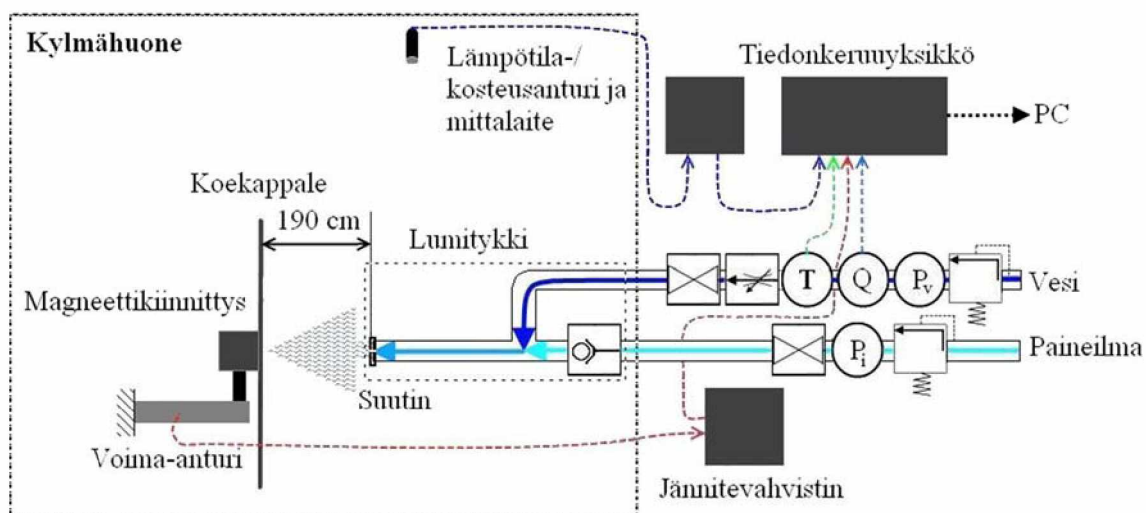
Kuva 11. Jään adheesiolujuus kaupallisiin jääfobisiin pinnoitteisiin. Sininen pylväs kuvaa keskimääräistä adheesiovoimaa ja punainen keskihajontaa. (Summer et al. 2004)

## 5 Kokeelliset menetelmät

Tutkimuksen kokeet suoritettiin Oulun yliopiston Konetekniikan Konelaboratorion kylmähuoneessa. Kokeita varten kylmähuoneeseen rakennettiin lumitykki ja tarvittavat mittalaitteet kokeiden suorittamista ja mittausdatan tallentamista varten. Laboratoriossa suoritettiin kaikkiaan noin 200 mittausta, joista varsinaisessa koevaiheessa 135 kappaletta.

### 5.1 Koelaboratorio ja tutkimuslaitteisto

Kylmähuoneen lämpötila voidaan laskea erillisen kylmälaitteiston avulla aina  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ :een. Kylmähuoneen lämpötila voidaan asettaa asteen kymmenyksen tarkkuudella. Kylmähuoneen sisällä on kylmälaitteiston höyrystimen kenno ja sen etupuolessa kaksinopeuksinen puhallin. Höyrystimen kenno kylmenee kylmälaitteiston toimiessa ja puhallin kierrättää kylmähuoneen ilmaa kennon läpi, jolloin ilman lämpötila laskee. Kylmähuoneen ilmankosteutta ei voi säätää. Kylmähuoneessa on myös ikkuna, josta voidaan visuaalisesti seurata lumitykin toimintaa ja koekappaleeseen kertyneen lumen määrää. Kuvassa 12 on esitetty koelaitteiston periaatekuva. Lumitykki, koekappale, voima-anturi ja lämpötilan ja kosteuden mittausanturi sijoitettiin kylmähuoneen sisälle. Lumitykin säätölaitteet sekä tiedonkeruuyksikkö ja tietokone sijoitettiin kylmähuoneen ulkopuolelle.

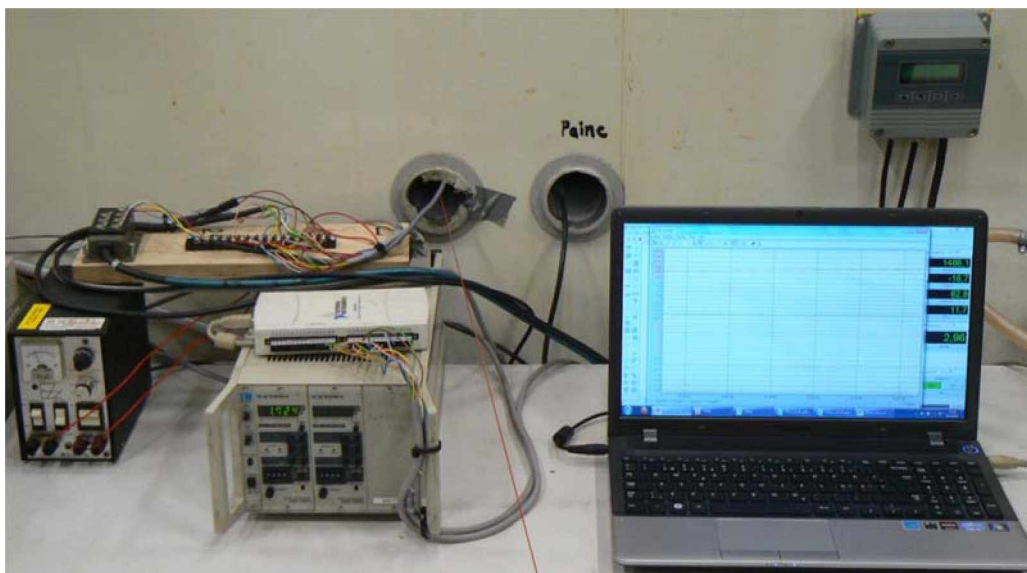


Kuva 12. Koelaitteiston periaatekuva. Kylmähuone on merkitty kuvaan isolla katkoviivalla piirretyllä suorakulmiolla. Merkkien selitykset:  $T$  = veden lämpötila-anturi,  $Q$  = veden virtausanturi,  $P_v$  = veden painemittari ja  $P_i$  = paineilman painemittari.

Tiedonkeruuyksikkönä käytettiin National Instrumentsin valmistamaa analogisilla sisääntuloilla ja 16-bittisillä digitaalisilla ulostuloilla varustettua NI USB-6211-yksikköä, joka liitettiin tietokoneeseen USB-kaapelilla. Tietokoneelle kerättiin kylmähuoneen lämpötilan ja ilmankosteuden tieto, veden virtaus- ja lämpötilatieto sekä voima-anturin tieto. Kylmähuoneen lämpötila ja kosteus mitattiin Vaisalan valmistamalla mittalaitteella, jonka tyyppi oli HMP233 A2A2A1EE12A1A1. Voima-anturina oli Raute Oy:n valmistama BA1-20kg-C3 -tyyppinen venymäliuska-anturi. Anturissa oli



neljä venymäliuska-anturia siltaan kytkettynä, jolloin lämpötilan vaikutus mittaustulokseen minimoitui. Voima-anturin signaali johdettiin ensin Kyowa CDV-700A-jännitevahvistimelle, josta vahvistettu ja suodatettu signaali tuotiin tiedonkeruuyksikköön. Jännitevahvistimessa oli nelinapainen 4. kertaluvun Butterworth-suodatin, jonka rajataajuus asetettiin 10 hertsiin. Veden lämpötilan mittauksessa käytettiin Phobyan valmistamaa termistorityyppistä anturia. Termistorin vastusarvo muuttui lämpötilan muuttuessa. Veden virtauksen mittauksessa käytetty anturi oli pyörivään siipirattaaseen perustuva GNR:n valmistama anturi. Siiven pyörimisnopeus oli suoraan verrannollinen veden virtaukseen ja siiven pyörimisnopeuden mittaaminen suoritettiin Hall-anturilla. Anturin teoreettinen tarkkuus oli 492 pulssia per litra ilman supistinta. Lumitykin veden virtausmäärä oli alhainen ja lumisuihku sykkivää, kun tykki oli toiminnassa. Virtausmittarin resoluutio oli 0,33 ml/s. Alhainen ja sykkivä virtausmäärä sekä virtausmittarin resoluutio aiheuttivat heiluntaa veden virtauksen mittaukseen, mutta tarkkuutta voitiin pitää riittävänä mittausten suorittamista varten. Lämpötila- ja virtausanturille otettiin käyttöjännite erillisestä Mascotin valmistamasta virtalähteestä. Mittauksien tiedot tallennettiin tietokoneelle, jotta tuloksia voitiin analysoida jälkikäteen. Kuvassa 13 on esitetty kylmähuoneen ulkopuolella olevat tiedonkeruuyksikkö, tietokone, jännitevahvistin, virtalähde ja tehdyt johdotukset.



Kuva 13. Mittauksissa käytetty tiedonkeruuyksikkö, tietokone, jännitevahvistin, virtalähde ja johdotukset. Kuvan oikeassa yläkulmassa on Vaisalan valmistama lämpötilan ja kosteuden mittalaite. Kuvan keskellä olevalla punaisella narulla nostettiin kylmähuoneen sisällä oleva suojuus.

Lumitykkinä oli messinkiyhteistä ja kupariputkesta valmistettu sisäisesti sekoittava tykki, joka on esitetty kuvassa 14. Tykkiin syötettiin vesi ylempänä olevaan yhteeseen ja paineilma alempaan yhteeseen. Vesi tuli tykkiin kohtisuoraan paineilmaan nähden ja sekoittui paineilmaan T-putkessa ja piipussa. Paine tykin sisällä oli noin neljä baa-ria. Vesi ja paineilma purkautuivat ulos suuttimeen poratusta reiästä. Paine putosi samalla ilmanpaineeseen, jolloin veden ja ilman lämpötilat laskivat ja vedestä muodostui hyvin pieniä pisaroita. Riippuen ilman lämpötilasta ja kosteudesta, pisarat muuttuivat lumeksi kuljettuaan ilmassa noin metrin verran.



*Kuva 14. Testeissä käytetty lumitykki. Vesi tulee lumitykkiin ylemmästä letkusta ja paineilma alemmasta. Paineilmayhteessä on myös takaiskuventtiili, joka estää veden pääsyn paineilmaputkistoon.*

Lumitykin säätämistä varten veden virtausta ja paineilman painetta voitiin säätää. Kuvassa 15 on esitetty veden ja paineilman säätämiseen käytetyt venttiilit ja veden lämpötila- sekä virtausanturi. Paineilman tuloletkuun oli asennettu Wilkerson RO8-C2-F00-paineenalennusventtiili ja painemittari. Mittauksia varten paineilman paine säädettiin noin 3,8–4,0 baariin. Veden virtauksen säätämistä varten veden tuloletkuun asennettiin TA Hydronicsin valmistama STAD monikierroksinen virtauksensäätöventtiili. Venttiili säädettiin niin, että veden virtaus lumitykkiin oli noin 2,6 ml/s silloin kun paineilman paine oli noin 3,8 bar:ia. Virtauksensäätöventtiili rikkoutui testi 1:n aikana, joten se poistettiin koelaitteistosta ennen testi 2:sta. Venttiilin rikkoutuminen aiheutti satunnaisen virtauksen säädön muuttumisen testin alussa, kun paineilmanaukaistiin lumitykkiä käynnistettäessä. Testi 2:ssa veden virtaus säädettiin sulkuventtiilillä. Veden tuloletkuun asennettiin myös Honeywell DO6F-1/2A -paineenalennusventtiili, jotta mahdolliset veden linjapaineen vaihtelut eivät häittäneet mittauksia.



*Kuva 15. Veden ja paineilman säätämiseen käytetyt venttiilit ja veden lämpötila- ja virtausanturi. Ylempi putkisto on vedelle ja alempi paineilmalle. Ensimmäinen mittari oikealla on paineilman paineen mittari ja sen vasemmalla puolella oleva sulkuventtiili on paineilman sulkuventtiili. Ylemmässä putkistossa on järjestyksessä oikealta paineenalennusventtiili, painemittari, veden virtausanturi, lämpötila-anturi ja sulkuventtiili. Kuva on otettu testi 2 mittauksien jälkeen, jolloin veden virtauksensäätöventtiili ei ole enää asennettuna.*

Koekappale kiinnitettiin voima-anturin päähän kiinnitettyyn magneettiin tukiraudan avulla. Tukirauta kiinnitettiin koekappaleen kulmiin porattuihin reikiin pulttiliitoksilla. Kuvassa 16 on esitetty koekappaleen kiinnitys ja voima-anturi. Tukirauta asetti koekappaleen aina samaan asentoon, jolloin lumitykin suihku osui koekappaleisiin aina samaan kohtaan ja samalla kulmalla. Voima-anturi suojattiin peltiputkella ja solumuovisella päätysuojalla, jolloin lunta ei päässyt kertymään magneetin tai voima-anturin päälle. Vain koekappaleeseen kertynyt lumi siis punnittiin. Magneetti kiinnitettiin voima-anturiin nivelellä, joka salli koekappaleen kulman säätämisen suhteessa lumisuihkuun. Lumitykin jalusta ja voima-anturin jalusta kiinnitettiin toisiinsa kahdella tukiraudalla. Tukiraudat varmistivat, että lumitykin ja koekappaleen etäisyys tai niiden sijainnit suhteessa toisiinsa eivät muuttuneet esimerkiksi lumen siivoustyön aikana. Lumitykin ja koekappaleen väliseksi etäisyydeksi säädettiin 190 cm.





*Kuva 16. Koekappaleen kiinnitys ja voima-anturi. Voima-anturin suojuks on poistettu kuvan ottamista varten.*

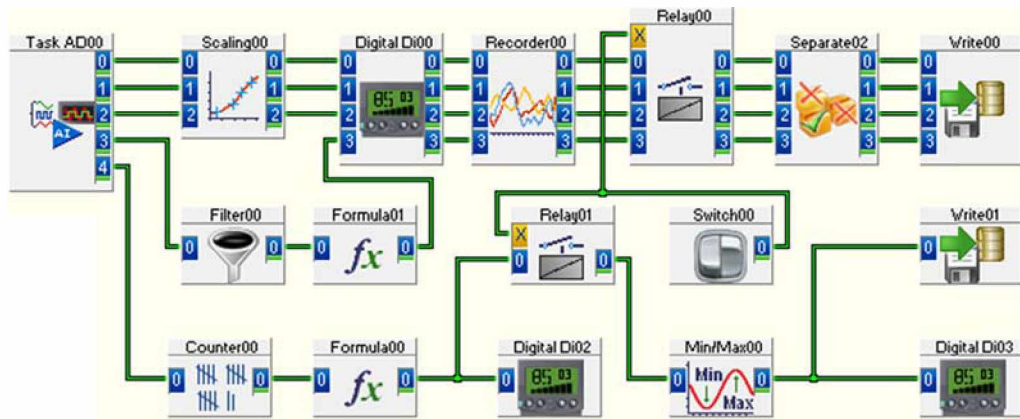
Lumitykin ja koekappaleen välissä oli ylösnostettava suojuks, jolla voitiin estää lumisuihkun osuminen koekappaleeseen. Kuvassa 17 on esitetty kylmähuoneessa oleva suoja. Suojus on tärkeä kun lumitykkiä käynnistetään, koska tällöin lumitykistä lentää isoja vesipisaroita, jotka muodostaisivat jäätä koekappaleeseen. Suoja alhaalla lumitykki voitiin myös käynnistää rauhassa ja säätää niin, että veden virtauksen ja paineilman arvot olivat oikeat. Suoja nostettiin narusta vetämällä kylmähuoneen ulkopuolelta.



*Kuva 17. Kylmähuoneen sisällä oleva lumitykki, koekappaleen suoja ja koekappale kiinnityksineen. Lattiantasolla olevat keltaiset tukiraudat kiinnittävät lumitykin jalustan ja anturin jalustan toisiinsa.*

Tiedonkeruuseen, tallennukseen ja mittausarvojen seuraamiseen käytettiin DASY-Lab9-ohjelmistoa. Ohjelmiston työkirjaan laadittiin tarvittavat moduulit, joiden avulla tiedonkeruuyksiköltä tulevat jännitteet muutettiin käyttökelpoiseen muotoon (kuva 18). Task-moduuli kuvaa tiedonkeruuyksikön viittä kanavaa, joihin anturit oli kytketty:

- kanava 0: voima-anturi,
- kanava 1: ilman lämpötila-anturi,
- kanava 2: ilmankosteusanturi,
- kanava 3: veden lämpötila-anturi,
- kanava 4: veden virtausanturi.



Kuva 18. DASYLabg -ohjelmiston mittaustyökirjan moduulit.

NI USB-6211 -tiedonkeruulaitteelle tulevat anturien mittaussignaalit ovat jännitesignaaleja. Tiedonkeruulaite muuttaa analogiset jännitesignaalit digitaalisiksi, joita käsitellään DASYLabg-ohjelmistolla. Kanavista tulevista tiedoista skaalataan (Scaling), suodatetaan (Filter) tai lasketaan (Counter) tieto haluttu muotoon, jotka näkyvät digitaalinäytöiltä (Digital) ja viivakuvaajasta (Recorder). Kytkimellä (Switch) ja releellä (Relay) ohjataan mittausdatan tallennusta (Write). Separoinnin (Separate) avulla hallitaan tallennettavien mittausnäytteiden lukumäärää. Mittaustaajuutena käytettiin 1000 Hz:iä, jotta virtausanturin korkeataajuuksinen mittaussignaali saatiin luettua oikein. Tallennustaajuudeksi asetettiin virtaustiedolle 0,5 Hz, muille 1 Hz.

Kolmen ensimmäisen kanavan jännitetieto skaalattiin lineaarifunktioilla, jotka olivat tiedossa aiemmista Konelaboratorion mittauksista. Lineaarifunktiot kanaville 0–2 on esitetty kaavoissa 1–3.

$$f(x) = ax + b = 862,5x \quad (1)$$

$$f(x) = 10x - 20 \quad (2)$$

$$f(x) = 10x - 0,1 \quad (3)$$

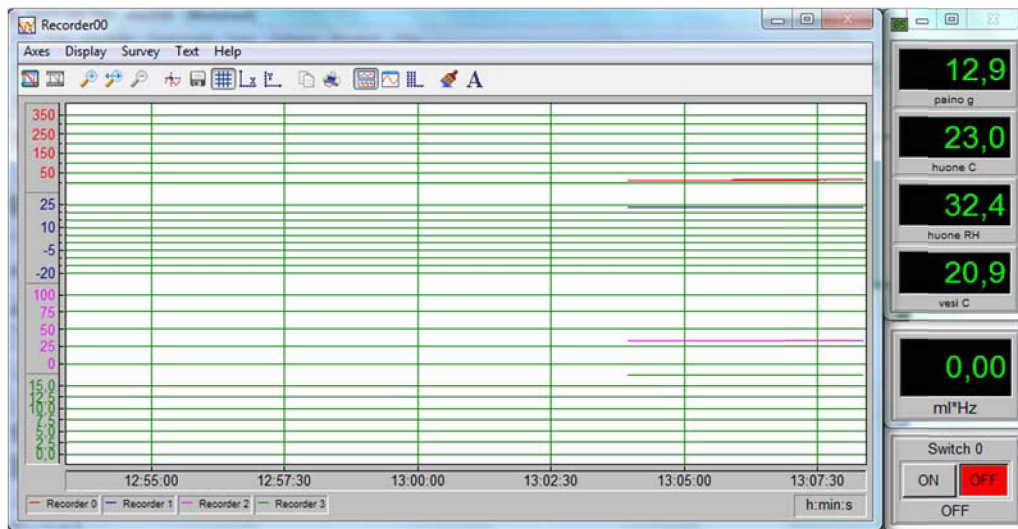
Veden lämpötilan anturi oli lineaarinen, mutta vaati suodatuksen (Filter) Butterworth-alipäästösuodattimella (rajataajuus 10 Hz) ylimääräisen kohinan poistamiseksi. Lineaarifunktio (kaava 4) määritettiin mittaamalla veden lämpötila kahdessa pisteessä kalibroidulla mittarilla ja kirjaamalla ylös vastaavat anturin tuottamat lukemat. Virtausanturi tuotti kanttiaaltoja, josta laskettiin (Counter) nousevat reunat. Laskettu pulssien lukumäärä skaalattiin Formula00-lohkolla (kaava 5) todelliseksi virtaukseksi siten, että vettä laskettiin astiaan, täyttymiseen kulunut aika mitattiin ja laskettiin skaalausfunktio. Min/Max00-lohkolla lasketusta tuloksesta otettiin maksimiarvo, jotta tulosten tallennus onnistui oikein. Kaavaan vaikutti osaltaan käytetty mittaustaajuus, DASYLab -ohjelman lohkon koko ja anturin tarkkuus. Luku 0,492 on anturivalmistaja ilmoittama teoreettinen pulssimäärä per millilitra ilman supistusholkkia. Luku 0,323 on korjauskerroin käytettäessä supistinta anturin sisällä.

$$f(x) = -9,189x + 68,458 \quad (4)$$



$$f(x) = \frac{1}{2} \cdot \frac{x}{0,492} \cdot 0,323 \quad (5)$$

Käyttöliittymää (kuva 19) hallitsi kuvaajapiirturi, jossa järjestyksessä ylhäältä alas punainen kuvaaja kirjasi koekappaleeseen kertyneen lumen massaa, sininen kylmähuoneen lämpötilaa, vaaleanpunainen kylmähuoneen ilmankosteutta ja vihreä veden lämpötilaa. Käyttöliittymässä oikealla olivat vastaavassa järjestyksessä edellä mainittujen kuvaajien reaaliaikaiset arvot ja lisäksi alimmaisena veden virtausarvo. On/off-kytkimellä aloitettiin ja päätettiin mittausdatan tallennus.



Kuva 19. DASyLabg -käyttöliittymä.

## 5.2 Testisuorituksen kuvaus

Testit ja niiden valmistelut tehtiin jokaisen koekappaleen kohdalla samalla tavalla, jotta suoritukset olivat yhdenmukaiset. Kylmähuoneen lämpötila ja ilmankosteus vakiinnutettiin kunkin testiproseduurin mukaisiin lähtöarvoihin ennen testin alkua. Myös veden lämpötila säädettiin tarkasti ennalta määrättyyn arvoon. Ilmankosteus ei ollut säädettävissä, mutta se oli verrannollinen ilmanlämpötilaan ja se asettui riittävän toistettavasti haluttuihin lähtöarvoihin. Koekappaleita säilytettiin kylmähuoneessa olleessa tiiviissä säilytyslaatikossa, jossa ne pysyivät vallitsevassa ilmanlämpötilassa, eikä niiden jäähtymistä ulkopuolisesta huonelämpötilasta tarvinnut odottaa. Jos koekappaleita oli tarve tuoda pois kylmähuoneesta, esimerkiksi lumesta ja jäästä puhdistamiseksi peräkkäisiä testejä suoritettaessa, koekappaleiden annettiin jäähtyä kylmähuoneen ilmanlämpötilaan ennen uuden testin alkua. Kunkin testin jälkeen koekappaleet puhdistettiin lumesta veden avulla kylmähuoneen ulkopuolella, kuivattiin huolellisesti paineilmalla ja vietiin säilytyslaatikkoon tai asetettiin mittalaitteistoon odottamaan uuden testin alkua.

Kun testille määritetyt lähtöarvot olivat vakiintuneet (ilman, veden ja koekappaleen lämpötilat, ilmankosteus), höyrystimen puhallin sammutettiin tai jätetään päälle, testistä riippuen. Seuraavaksi käynnistettiin lumitykki (suoja alhaalla) avaamalla veden virtauksen sulkuventtiili ja säätämällä virtaus haluttuun arvoon. Virtauksensäätövent-

tiilin ollessa käytössä säätäminen joka testin alussa ei ollut tarpeellista. Tämän jälkeen avattiin paineilman sulkuventtiili paineen ollessa esisäädetty vakioarvoon. Kylmän veden ja paineilman sekoittuessa lumitykin yhteissä seurauksena oli tyypillisesti suuttimen jäätyminen ensimmäisillä käynnistyskerroilla, riippuen käytetystä suutinkoosta. Kun ilma ja vesi virtasivat häiriöttä lumitykistä ja niiden paine- ja virtausarvot olivat ennalta määritetyssä vaihteluvälissä, aloitettiin testi nostamalla suoja yläasentoon ja asettamalla mittauksen tallennus käyntiin yhtäaikaaisesti.

Testin päätyttyä suoja laskettiin ala-asentoon, tallennus päätettiin ja lumitykki sammutettiin käänteisessä järjestyksessä. Koekappale valokuvattiin, kirjattiin mahdolliset huomiot testin kulusta, puhdistettiin koekappale ja tarvittaessa myös kylmähuone. Lumitykki ja vesiletku tyhjennettiin vedestä paineilmalla jäätymisen välttämiseksi. Mittausdata tallennettiin Excel-työkirjaan analysointia varten.

## 5.3 Testi 1: Pinnoitteen vaikutus lumen kertymisnopeuteen

Ensimmäisellä testillä selvitettiin pinnoitteen vaikutusta lumen kertymisnopeuteen. Testi aloitettiin kylmähuoneen lämpötilan ollessa  $-17\text{ °C}$  ja veden lämpötilan ollessa  $8,5\text{--}9,0\text{ °C}$ . Kylmähuoneen höyrystimen puhallin oli sammutettu testin ajaksi, jotta höyrystimen kenno ei lumettuisi testin aikana. Tällä tavalla toimimalla nopeutettiin testien suorittamista, koska kennon ylimääräisiltä sulatuksilta välttyttiin. Testissä koekappaletta suihkutettiin lumella viiden minuutin ajan. Tämän jälkeen koekappale puhdistettiin vedellä ja kuivattiin paineilmalla. Kokeet suoritettiin aina kolmen koekappaleen kierrolla, jotta koekappaleiden lämpötilat ehtivät laskea kylmähuoneen lämpötilaan testien välissä. Testi suoritettiin kaikille pinnoitetuille koekappaleille ja vertailuna käytettiin pinnoittamatonta teräksistä koekappaletta.

Testin alulla oli suurin merkitys tuloksia arvioitaessa. Testin alussa kaikki lumen muodostumiseen ja tarttumiseen vaikuttavat asiat säädettiin mahdollisimman tarkkaan, jotta alussa kertyvän lumen määrää voitiin vertailla aina sitä vastaavaan teräksen referenssimittaukseen. Testi 1:ssä oli käytössä monikierroksinen virtauksensäätöventtiili, joka oli säädetty siten, että paineilman paineen ollessa noin  $3,8\text{ baaria}$  oli veden virtaus noin  $2,6\text{ ml/s}$ . Testin aikana koekappaleeseen ehti kertyä lunta noin  $150\text{--}170\text{ g}$ . Kuvassa 20 olevassa koekappaleessa on noin  $150\text{ g}$  lunta kertyneenä.

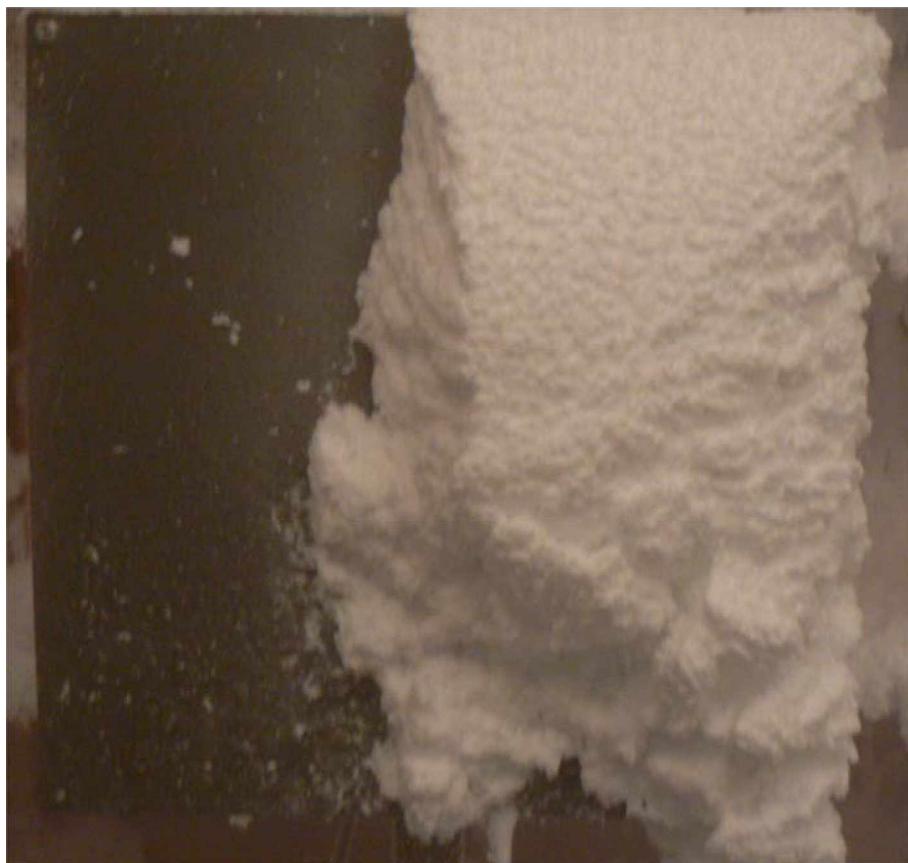


Kuva 20. Koekappaleeseen on kertynyt noin 150 g lunta.

## 5.4 Testi 2: Pinnoitteen vaikutus lumen ja pinnan väliseen adheesioon

Testi 2:ssa koekappaletta suihkutettiin lumella niin kauan kunnes lumi tippui tai murtui sen painon aiheuttamasta kuormasta. Tässä testissä kylmähuoneessa olevaa höyrystimen kennon puhallinta ei sammutettu testin ajaksi. Testi aloitettiin, kun kylmähuoneen lämpötila oli  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja veden lämpötila  $8,5\text{--}9,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Testissä 2 ei ollut enää käytössä monikierroksinen virtauksensäätöventtiili, vaan veden virtaus säädettiin sulkuventtiilillä joka testikerran alussa. Lumitykki käynnistettiin säätämällä veden virtaus arvoon  $19,2\text{ ml/s}$  ilman paineilmaa. Veden virratessa tasaisesti paineilman sulkuventtiili aukaistiin ja tällöin veden virtaus tippui arvoon  $2,6\text{ ml/s}$ . Paineilman paineella voitiin vielä hienosäätää veden virtausta.

Koetta jatkettiin niin kauan kunnes lumi murtui tai tippui koekappaleesta. Lumen tippuessa osittain korkeussuunnassa jatkettiin koetta niin kauan kunnes toinenkin puoli koekappaleesta olevasta lumesta tippui. Kuvassa 21 on esitetty koekappale R10, josta noin puolet koekappaleesta olevasta lumesta on pudonnut. Tässä tapauksessa suojus laskettiin alas ja koekappale käytiin valokuvaamassa, jonka jälkeen suojus nostettiin ylös. Lumitykkiä ei sammutettu kuvan ottamisen ajaksi. Testejä suoritettiin kaksi tai kolme päivässä ja testien välissä koekappale puhdistettiin vedellä ja kuivattiin paineilamalla. Koekappaleiden annettiin jäähtyä kylmähuoneessa noin 45 minuuttia ennen seuraavan kokeen aloittamista.



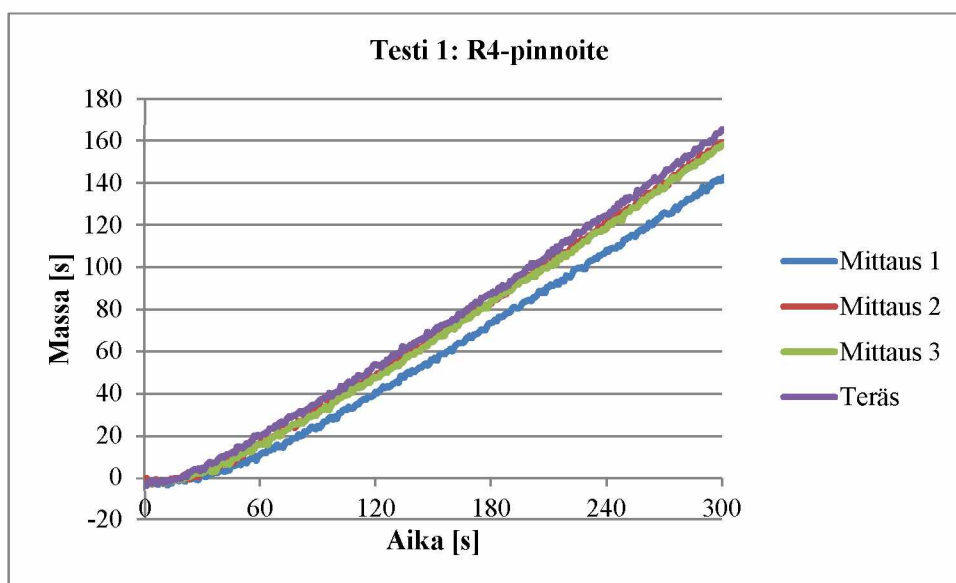
*Kuva 21. Koekappale R10, josta on tippunut puolet lumesta.*

## 6 Koetulokset

Koetuloksissa oli vaihtelevuutta niin, että pinnoite mikä suoriutui positiivisesti testi 1:ssä, ei välttämättä suoriutunutkaan niin hyvin testi 2:ssä. Tämä ilmeni esimerkiksi siten, että pinnoite johon lumi tarttui voimakkaasti testissä 1, toimi hyvin testissä 2 ja päinvastoin, kuten tämän luvun koetuloksista ilmenee.

### 6.1 Testi 1

Testi 1:ssä tärkein osuus oli testin alku, jolloin lumi ei vielä peittänyt koekappaletta kokonaan. Tällöin pinnoitteen vaikutus lumen kertymisnopeuteen oli suurimmillaan. Kuvassa 22 on esitetty R4-koekappaleen mittaukset ja vertailuteräksen mittaus. Kaikille pinnoitteille suoritettiin vastaavanlaiset mittaukset. Mittauksien ensimmäisten 60 sekunnin jälkeen kertymisnopeus oli lähes vakio, jolloin voidaan olettaa, että lunta oli jo kertynyt niin paljon, että lumi alkoi kertyä jo kertyneen lumen päälle. Tämä oli havaittavissa kuvaajan suoristumisena kuvassa 22. Tällöin koekappaleen pinnan vaikutus kertymisnopeuteen loppui.



Kuva 22. R4-koekappaleen Testi 1:n mittaukset. Ensimmäisessä mittauksessa tykki ei ole toiminut oikein, joten mittauksia ei huomioida.

Testi 1:n tulokset on esitetty taulukoissa ja pistekaavioissa. Tulosten keskimääräinen massa on laskettu kyseisen koekappaleen kaikkien mittauksien ajanhetkien 59, 60 ja 61 sekuntien massoista. Ottamalla laskuissa huomioon kustakin mittauksesta kolme mittauksitulosta saadaan massan mittaussignaalin kohinan vaikutusta tuloksiin alennettua. Kohina massan mittaussignaalin oli noin  $\pm 2$  g. Ottamalla huomioon nämä ja muut mahdolliset virhelähteet, kuten veden virtauksen muutos, paineilman paineen muutos voidaan arvioida mittausepävarmuudeksi  $\pm 10$  %. Ero on laskettu aina vastaaviin, saman päivän aikana suoritettuihin teräksen referenssimittauksiin.

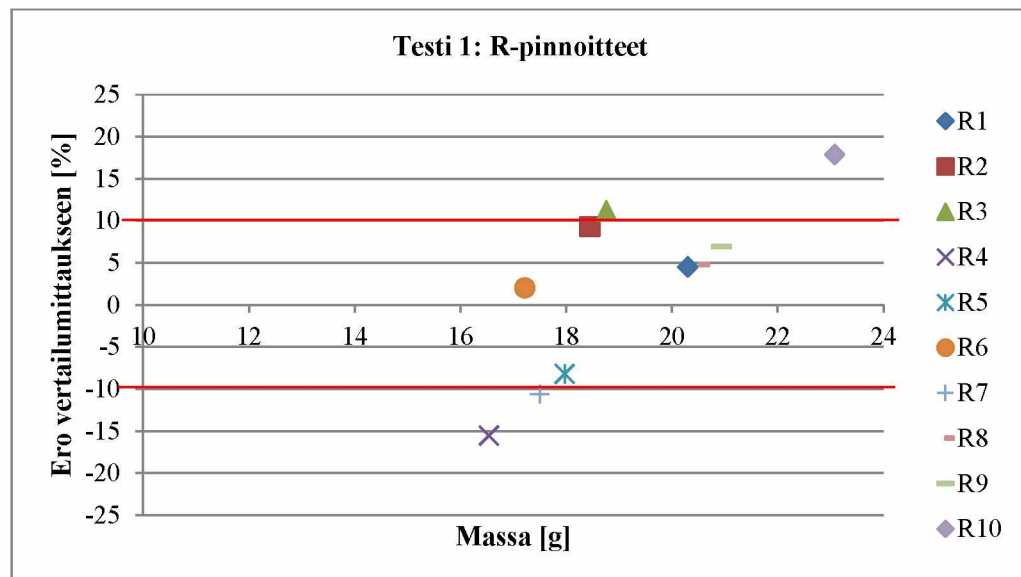


### 6.1.1 R-pinnoitteet

Taulukossa 2 on esitetty R-pinnoitteiden mittauksien keskimääräinen massa ja ero vertailumittauksiin. Kuvassa 23 on esitetty testi 1:ssä mitattujen R-pinnoitteiden keskimääräinen massa ja ero vertailumittauksien keskiarvoihin. Kuvaan on lisätty mittausepävarmuus  $\pm 10\%$  punaisilla viivoilla.

Taulukko 2. R-pinnoitteiden keskimääräinen massa ja ero vertailumittaukseen. Mittausepävarmuus on  $\pm 10\%$ .

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
Massa [g]	20,3	18,4	18,8	16,5	18,0	17,2	17,5	20,5	20,9	23,1
Ero [%]	4,5	9,3	11,2	-15,5	-8,2	2,0	-10,6	4,8	6,9	17,9



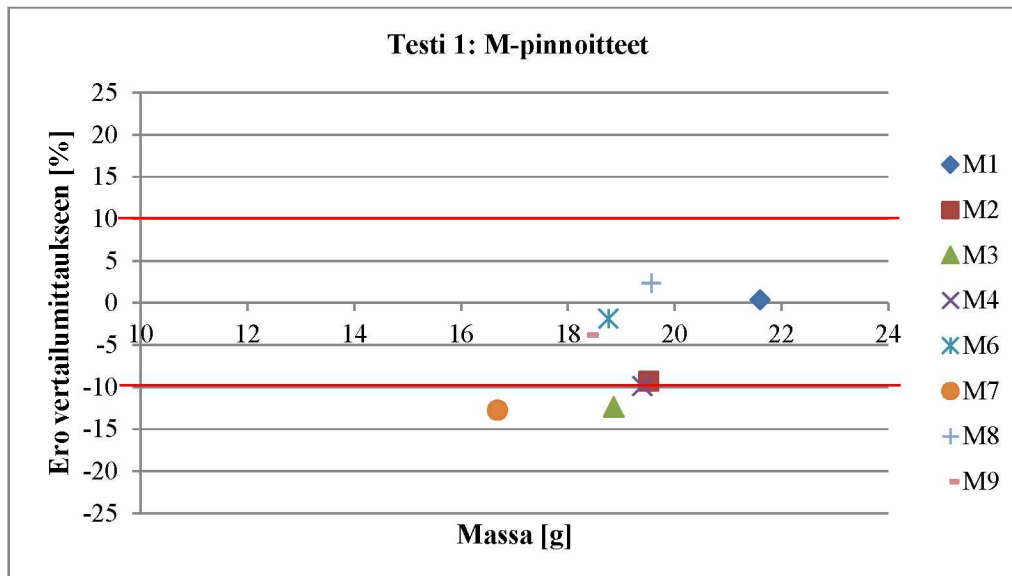
Kuva 23. Teknisillä muoveilla pinnoitettujen koekappaleiden keskimääräiset massat ja ero [%] vertailuteräksien massoihin. Punaisilla viivoilla on merkitty  $\pm 10\%$  mittausepävarmuus.

### 6.1.2 M-pinnoitteet

Taulukossa 3 on esitetty M-pinnoitteiden mittauksien keskimääräinen massa ja ero vertailumittauksiin. Kuvassa 24 on esitetty testi 1:ssä mitattujen M-pinnoitteiden keskimääräinen massa ja ero vertailumittauksien keskiarvoihin.

Taulukko 3. M-pinnoitteiden keskimääräinen massa ja ero vertailumittaukseen. Mittausepävarmuus on  $\pm 10\%$ .

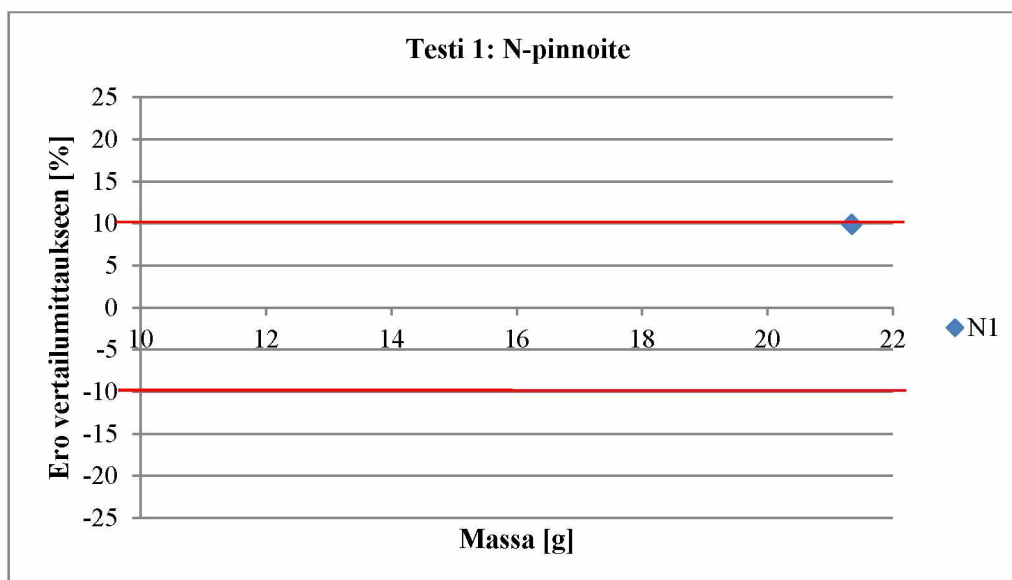
	M1	M2	M3	M4	M6	M7	M8	M9
Massa [g]	21,6	19,5	18,9	19,4	18,8	16,7	19,6	18,4
Ero [%]	0,4	-9,3	-12,4	-9,9	-1,9	-12,7	2,3	-3,8



Kuva 24. Millidyne Oy:n pinnoittamien koekappaleiden keskimääräiset massat ero ja [%] vertailuteräksien massoihin. Punaisilla viivoilla on merkitty  $\pm 10$  % mittausepävarmuus.

### 6.1.3 N-pinnoite

N-pinnoitteella keskimääräinen massa oli 21,3 g ja ero vertailumittauksiin + 9,9 %. Kuvassa 25 on esitetty massa N-pinnoitteella ja ero vertailumittaukseen.



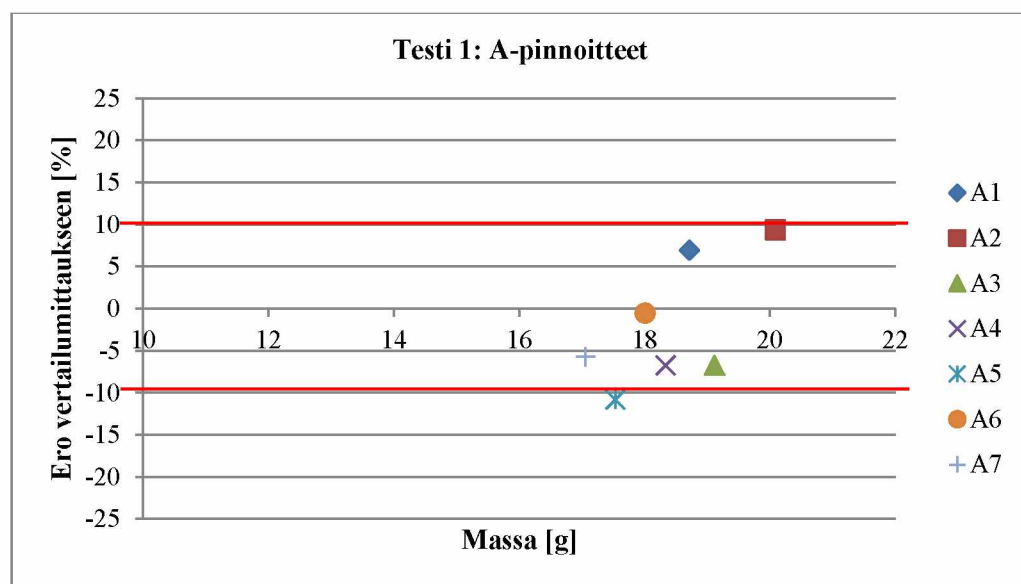
Kuva 25. Kaksikomponenttisilikonilla pinnoitetun koekappaleen keskimääräinen massa ja ero [%] vertailuteräksien keskimääräisiin massoihin. Punaisilla viivoilla on merkitty  $\pm 10$  % mittausepävarmuus.

### 6.1.4 A-pinnoitteet

Taulukossa 4 on esitetty A-pinnoitteiden mittauksien keskimääräinen massa ja ero vertailumittauksiin. Kuvassa 26 on esitetty testi 1:ssä mitattujen M-pinnoitteiden keskimääräinen massa ja ero vertailumittauksien keskiarvoihin.

Taulukko 4. A-pinnoitteiden keskimääräinen massa ja ero vertailumittaukseen. Mittausepävarmuus on  $\pm 10$  %.

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Massa [g]	18,7	20,1	19,1	18,3	17,5	18,0	17,1
Ero [%]	6,9	9,4	-6,7	-6,7	-10,8	-0,5	-5,7



Kuva 26. Kylmäkeraameilla pinnoitettujen koekappaleiden keskimääräiset massat ja ero [%] vertailuteräksien massoihin. Punaisilla viivoilla on merkitty  $\pm 10$  % mittausepävarmuus.

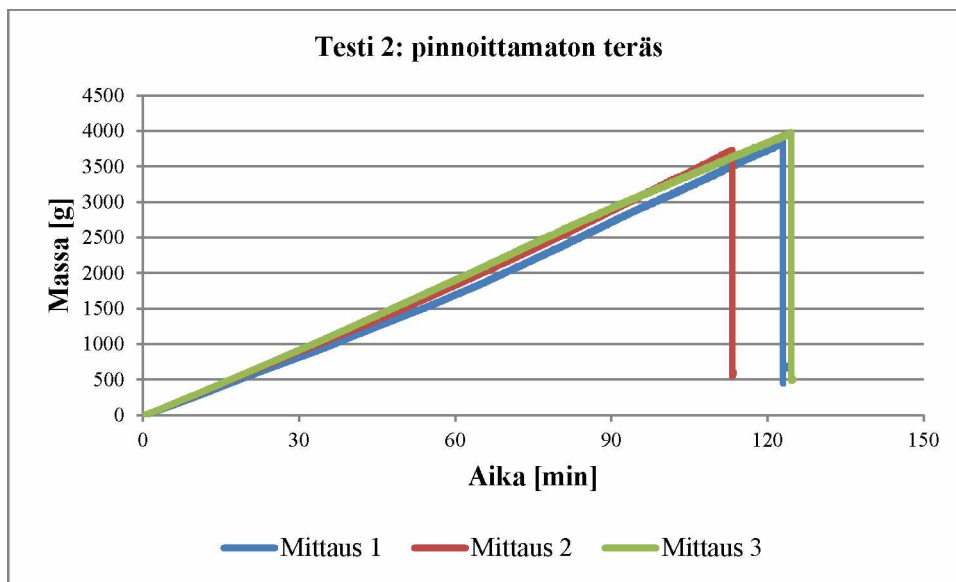
## 6.2 Testi 2

Testi 2 suoritettiin vastaavasti kuin testi 1, mutta tällä kertaa höyrystimen kennon puhallin pidettiin suurimmalla asetuksella (1400 r/min) ja lumen annettiin kertyä, kunnes murtuminen tapahtui joko rajapinnassa tai kohesiivisesti. Peräkkäin oli mahdollista suorittaa kaksi mittausta, jonka jälkeen kenno vaati sulatuksen, jotta jäähdytysteho säilyi riittävänä. Kennon lumettumisesta johtuen peräkkäisistä mittauksista jälkimmäinen oli lyhyempi kuin ensimmäinen. Kennon lumettuessa ilmavirtaus sen läpi on pienempi, jolloin kennon puhallin imee vähemmän huoneilmaa ja ilmassa olevaa lunta kennon läpi ja lunta kertyy nopeammin koekappaleen pinnalle.

Testi 2:n tulokset on esitetty viivakaavioissa ja taulukoissa. Viivakaaviot kuvaavat lumen kertymisen kaikissa testeissä alusta siihen ajanhetkeen, jolloin lumi murtui koekappaleesta. Lumen kertymisnopeudesta ei kaavioiden perusteella voi tehdä johtopäätöksiä, koska kennon lumettuminen vaikuttaa kertymisnopeuteen. Taulukoista ilmenee tarkat massat, joilla lumi murtui koekappaleesta. Tyhjä sarake ”2. pudotus” tarkoittaa, että lumi on murtunut koekappaleesta yhdessä osassa.

Tässä testissä mittausepävarmuus ei ollut sama kuin edellisessä testissä. Voima-anturin kohina muuttuu, kun lunta kertyy koekappaleeseen, koska kappaleen massa kasvaa ja etäisyys lumitykkiin pienenee. Mittausepävarmuus on arvioitu määrittämällä kaikista mittauksista voima-anturin tuottama massan maksimiarvo ja minimiarvo testin viimeisiltä sekunneilta ennen lumen irtoamista koekappaleesta ja vertaamalla sitä loppuarvoon. Virhelähteiden myötä mittausepävarmuus testissä oli  $\pm 0,4$  %, mikä tarkoittaa esimerkiksi 4000 g lumimassalla 16 g virhettä mittauksessa. Virhe on pieni, joten sitä ei erikseen mainita mittautuloksissa.

Pinnoittamattomalla teräslevyllä suoritettiin kolme referenssikokeetta (kuva 27). Taulukossa 5 on esitetty teräksen adheesiokokeiden tulokset. Kokeissa lumi murtui, kun kertymä oli 3730–3970 g. Lumen jäännösmassa oli 500–670 g ja aikaa kului 113–125 minuuttia. Kokeissa lumen adheesiovoima teräkseen oli suurempi kuin lumen sisäiset koheesiovoimat, jolloin tapahtui kohesiivinen murtuminen. Kuvassa 28 on esitetty teräslevyt, joista lumi on murtunut ja pudonnut. Kokeet pinnoittamattomilla teräksillä osoittivat hyvää toistettavuutta. Referenssikokeiden kulku ja olosuhdeparametrit on esitetty liitteessä 3.



Kuva 27. Lumen kertymä ja irtoaminen pinnoittamasta teräslevystä.

Taulukko 5. Pinnoittamattomien teräslevyjen irtoamis- ja jäännösmassat.

Mittaus	1. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]	2. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]
1.	3840	670	-	-
2.	3730	570	-	-
3.	3970	500	-	-



Kuva 28. Kokeet pinnoittamattomille teräslevyille (mittaukset 1–3).

Tutkimussuunnitelman mukaisesti adheesiokokeisiin valittiin potentiaalisia materiaaleja kertymisnopeuskokeen perusteella. Koska erot kertymisnopeuskokeissa pinnoitettujen ja pinnoittamattomien terästen välillä olivat hyvin pieniä ja ne olivat lähellä mittausepävarmuutta, valittiin materiaaleja myös sen perusteella, miten helposti lumi oli poistettavissa koekappaleen pinnalta kokeen jälkeen. Myös hyvä hydrofobiisuus oli valintaperuste. Kokeiden pituuden ja höyrystinkennon vaatimien pitkien sulatusjaksojen vuoksi kultakin valmistajalta, joilla oli enemmän kuin yksi pinnoite, testattiin neljä pinnoitevaihtoehtoa.

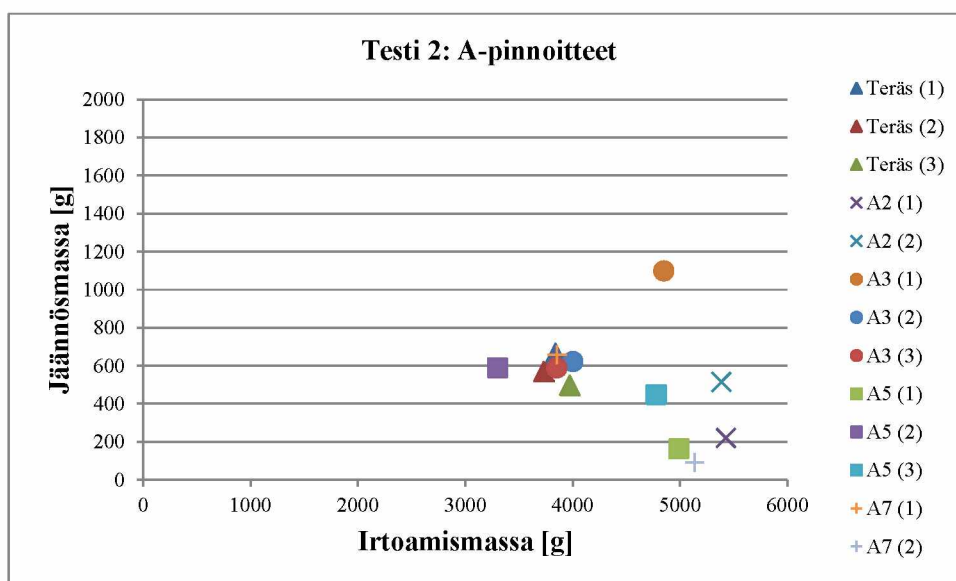
Kokeiden käynnistyttyä ilmeni nopeasti, etteivät kertymisnopeuskokeen tulokset ja muut ennalta määritetyt valintaperusteet korreloineet adheesiokokeen tuloksien kanssa, joten koemateriaalien valintaa muutettiin. Kultakin valmistajalta oli kokeissa yksi pinnoitetyyppi, mutta pinnoitteet olivat keskenään erilaisia. Näin päädyttiin mittaamaan mahdollisimman monta erilaista pinnoitetta yhden pinnoitetyypin sisältä.

Mittausten kulku (kertymä ajan funktiona) ja ympäristöolosuhteet (ilman ja veden lämpötila, suhteellinen kosteus) mittauksen aikana on esitetty liitteissä. Liitteissä mittaukset on lueteltu seuraavasti:

- A-pinnoitteet: liitteet 4–7,
- M-pinnoitteet: liitteet 8–11,
- N-pinnoite: liite 12 ja
- R-pinnoitteet: liitteet 13–16.

### 6.2.1 A-pinnoitteet

Kuvassa 29 on esitetty adheesiokokeen tulokset kylmäkeraamipinnoitteille A2, A3, A5 ja A7. Tuloksista ilmenee lumen jäännösmassa irtoamismassan funktiona. Tuloksissa oli suurta vaihtelua myös saman pinnoitemateriaalin keskinäisissä mittauksissa, mutta valituista pinnoitteista yksikään ei toiminut verrattuna pinnoittamattomaan teräkseen. Kokeet etenivät kahdella eri tavalla. Kun lumen irtoamismassa oli lähellä teräksen vertailuarvoa, myös jäännösmassa oli hyvin lähellä vertailuarvoa. Vastaavasti kun irtoamismassa oli terästä suurempi, jäännösmassa oli tyypillisesti alhaisempi. Alhainen jäännösmassa voi olla seurausta suuresta kertymästä, eikä niinkään materiaalin hyvyydestä.



Kuva 29. Lumen jäännösmassa A-pinnoitteilla irtoamismassan funktiona.

Taulukossa 6 on esitetty A2 pinnoitteen adheesiokokeiden mittauksien tulokset. Kuvassa 30 on esitetty adheesiokokeen mittauksien valokuvat. Pinnoitteella A2 lumen irtoamismassat mittauksissa 1 ja 2 olivat 5430 g ja 5390 g. Vastaavat jäännösmassat olivat 230 g ja 530 g. Molemmissa kokeissa lumen massa oli niin suuri, että koekappaleen kiinnitys antoi periksi, levy liikahti ja lumi irtosi. Jäännösmassoissa oli suuri ero ja ne eivät olleet täysin totuudenmukaiset, koska lumi ei irronnut omalla painollaan, vaan levyn liikkumisen seurauksena. Tämä on kuitenkin epäoleellista, koska lumen kertymä oli selkeästi pinnoittamatonta terästä suurempi.



Taulukko 6. Pinnoite A2: irtoamis- ja jäännösmassat.

Mittaus	1. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]	2. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]
1.	5430	230	-	-
2.	5390	530	-	-
3.	-	-	-	-



Kuva 30. Pinnoite A2: mittaukset 1 ja 2. Koekappaleet ovat kallistuneet hieman lumen painosta.

Pinnoitteella A3 lumimassoissa oli suurta vaihtelua. Mittauksien 1–3 irtoamismassat suuruusjärjestyksessä olivat 3850–4850 g ja jäännösmassat 590–1100 g. Taulukossa 7 on esitetty irtoamis- ja jäännösmassat. Kuvassa 31 on esitetty pinnoite A3:lle tehtyjen adheesiokokeiden jälkeiset valokuvat. Mittaukset 1 ja 2 olivat hyvin erilaiset, joten koe suoritettiin kolmeen kertaan. Pinnoite A3 ei toiminut terästä paremmin, mutta paremmin kuin A2. Lumen käyttäytyminen oli samanlaista kuin teräksellä, murtumiset olivat kohesiivisiä.

Taulukko 7. Pinnoite A3: irtoamis- ja jäännösmassat.

Mittaus	1. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]	2. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]
1.	4850	1100	-	-
2.	4000	620	-	-
3.	3850	590	-	-



Kuva 31. Pinnoite A3: mittaukset 1–3.

Taulukossa 8 on esitetty pinnoite A5:lle tehtyjen adheesiokokeiden tulokset ja kuvas-  
sa 32 kokeiden jälkeiset valokuvat. Pinnoite A5 käyttäytyi hyvin samanlaisesti kuin  
A3, lumen kertymä oli suuri ja mittaustulokset vaihtelivat paljon. Mittauksissa 1 ja 3  
lumen käyttäytyminen oli yhdistelmä kohesiivisesta ja rajapinnassa tapahtuneesta  
murtumasta ja irtoamismassa lähes 5000 g. Mittauksen 2 murtuminen oli kohesiivi-  
nen ja tapahtui 3300 g lumimassalla.

Taulukko 8. Pinnoite A5: irtoamis- ja jäännösmassat.

Mittaus	1. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]	2. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]
1.	4990	160	-	-
2.	3300	590	-	-
3.	4780	450	-	-



Kuva 32. Pinnoite A5: mittaukset 1–3.

Taulukossa 9 on esitetty pinnoite A7:lle tehtyjen adheesiokokeiden tulokset ja kuvas-  
sa 33 kokeiden jälkeiset valokuvat. Pinnoitteella A7 vaihtelua mittaustuloksissa oli  
jälleen paljon, mutta kolmatta mittausta ei suoritettu, koska kertymät olivat suurem-  
pia kuin teräksellä. Mittauksessa 1 lumen kertymä oli 3860 g ja jäännösmassa 660 g.  
Mittauksessa 2 kertymä oli 5140 g 90 g jäännösmassalla. Mittaus 1 oli teräksen kal-  
tainen, jossa tapahtui kohesiivinen murtuminen. Mittaus 2:n lopputulos oli erinomai-



nen, murtuminen tapahtui rajapinnassa ja levy tuli lähes puhtaaksi lumesta. Murtuminen vaati kuitenkin suuren lumimassan tapahtuakseen.

*Taulukko 9. Pinnoite A7: irtoamis- ja jäännösmassat.*

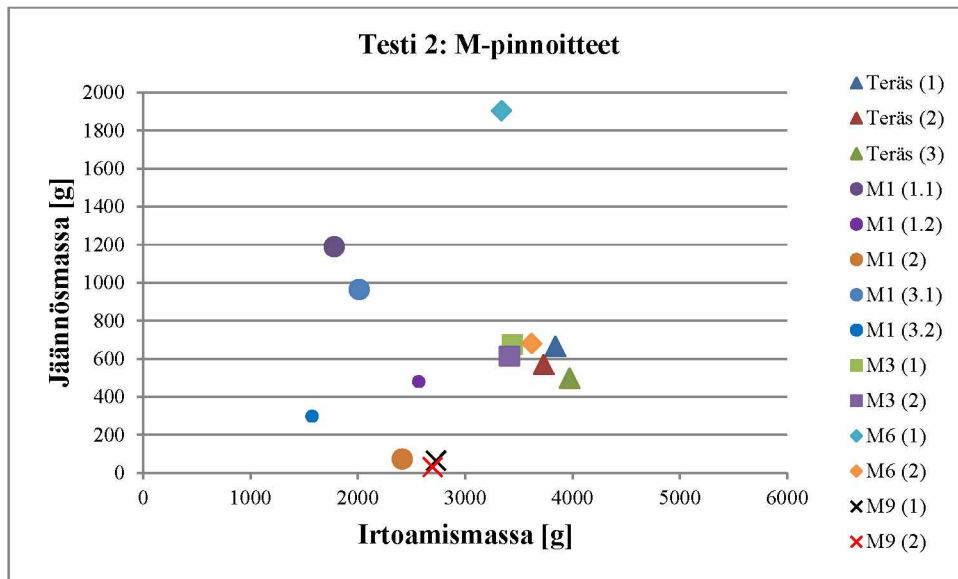
Mittaus	1. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]	2. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]
1.	3860	660	-	-
2.	5140	90	-	-
3.	-	-	-	-



*Kuva 33. Pinnoite A7: mittaukset 1 ja 2.*

### 6.2.2 M-pinnoitteet

Nanopinnoitteista testattiin pinnoitteet M1, M3, M6 ja M9 (kuva 34). Kaikilla testatuilla koemateriaaleilla lumen irtoaminen tapahtui pienemmällä lumimassalla kuin pinnoittamattomalla teräksellä. Mittausten kulku on esitetty liitteissä 8–11.



Kuva 34. Lumen jäännösmassa irtoamismassan funktiona M-pinnoitteilla. Sekundäriset irtoamiset vastaavalla värillä ja pienemmällä merkillä.

Taulukossa 10 on esitetty pinnoite M1:n adheesiokokeiden tulokset. Kuvassa 35 on esitetty pinnoite M1:n adheesiokokeiden mittauksien 1–3 loppukuvat. Ensimmäisessä mittauksessa lumi irtosi koekappaleesta kahdessa osassa. Ensimmäinen pudotus tapahtui, kun lunta oli kertynyt koekappaleeseen 1780 g. Pudotuksen jälkeen lunta jäi vielä 1190 g koekappaleen oikealle reunalle. Toinen lumen irtoaminen tapahtui, kun lunta oli 2570 g ja sen jälkeen lunta jäi koekappaleeseen 480 g. Tällöin lumi tippui koekappaleen oikeasta reunasta. Toisessa mittauksessa lumi tippui koekappaleesta massalla 2410 g ja lumen jäännösmassaksi jäi 73 g. Kolmas mittaus suoritettiin jälkikäteen ja tällöin lumi tippui myös kahdessa osassa: massalla 2010 g (jäännösmassa 960 g) ja massalla 1570 g (jäännösmassa 300 g). Kuvan 35 oikeanpuoleisin valokuva on tämän mittauksen viimeisimmän pudotuksen jälkeinen valokuva. Pinnoitteella M1 lumi irtosi aina koekappaleen ja lumen välisestä rajapinnasta.

Taulukko 10. Pinnoite M1: irtoamis- ja jäännösmassat.

Mittaus	1. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]	2. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]
1.	1780	1190	2570	480
2.	2410	73	-	-
3.	2010	960	1570	300



Kuva 35. Pinnoite M1: mittaukset 1–3.

Pinnoite M3 toimi samankaltaisesti kuin pinnoittamaton teräs. Lumen koheesiiviset murtumiset tapahtuivat, kun massat olivat noin 3400 g, mikä oli noin 400 g vähemmän kuin teräksellä. Jäännösmassat olivat lähellä teräksen arvoja, 620–680 g. Taulukossa 11 on esitetty adheesiokokeiden tulokset ja kuvassa 36 koekappaleet lumen pudotamisen jälkeen.

Taulukko 11. Pinnoite M3: irtoamis- ja jäännösmassat.

Mittaus	1. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]	2. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]
1.	3440	680	-	-
2.	3410	620	-	-
3.	-	-	-	-



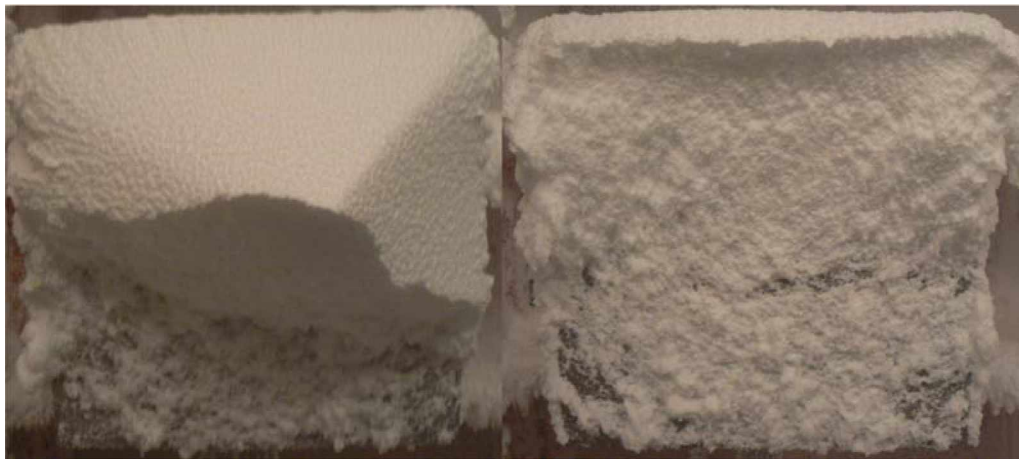
Kuva 36. Pinnoite M3: mittaukset 1 ja 2.

Taulukossa 12 on esitetty pinnoite M6:lle tehtyjen adheesiokokeiden tulokset. Kuvassa 37 on esitetty pinnoite M6:n valokuvat mittauksien jälkeen. Ensimmäisessä mittauksessa levy oli irronnut osittain kiinnityksestä. Kun koekappale irtosi, oli se samalla iskeytynyt voima-anturin suojukseen ja tästä aiheutunut isku koekappaleen ala-

reunaan oli irrottanut lumen. Lumi irtosi koekappaleen alareunasta. Toisessa mittauksessa lumi oli murtunut vastaavalla tavalla kuin teräksien mittauksissa. Toisen mittauksen irtoamismassa 3620 g ja jäännösmassa 680 g olivat hyvin lähellä teräksen vastaavia arvoja.

*Taulukko 12. Pinnoite M6: irtoamis- ja jäännösmassat.*

Mittaus	1. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]	2. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]
1.	3340	1910	-	-
2.	3620	680	-	-
3.	-	-	-	-



*Kuva 37. Pinnoite M6: mittaukset 1 ja 2. Ensimmäisen mittauksen lopussa (vasen kuva) koekappale irtosi osittain kiinnityksestä.*

Taulukossa 13 on esitetty pinnoite M9:lle tehtyjen adheesiokokeiden tulokset. Kuvas-  
sa 38 on esitetty valokuvat koekappaleesta kokeen loputtua. Molemmissa mittauksis-  
sa lumi irtosi pinnoitteen ja lumen rajapinnasta ja toisessa mittauksessa koekappale  
tuli käytännössä täysin puhtaaksi lumesta.

*Taulukko 13. Pinnoite M9: irtoamis- ja jäännösmassat.*

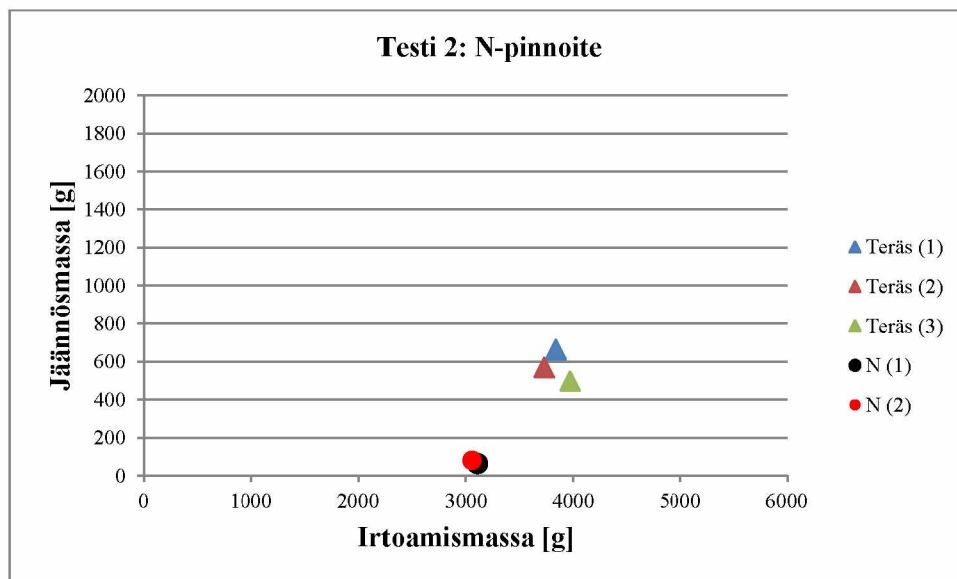
Mittaus	1. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]	2. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]
1.	2730	65	-	-
2.	2700	30	-	-
3.	-	-	-	-



Kuva 38. Pinnoite Mg: mittaukset 1 ja 2.

### 6.2.3 N-pinnoite

N-pinnoitteelle suoritettujen mittauksien tulokset ilmenevät kuvasta 39 ja taulukosta 14. Mittauksissa tapahtui osittain lähellä rajapintaa tapahtunut kohesiivinen ja osittain rajapinnassa tapahtunut murtuminen (kuva 40). Kokeissa lumen irtoamismassat olivat 3110 g ja 3060 g, lunta jäi koeappaleisiin vastaavasti 65 ja 80 g.



Kuva 39. Lumen jäännösmassa irtoamismassan funktiona N-pinnoitteilla.



Taulukko 14. Pinnoite N: irtoamis- ja jäännösmassat.

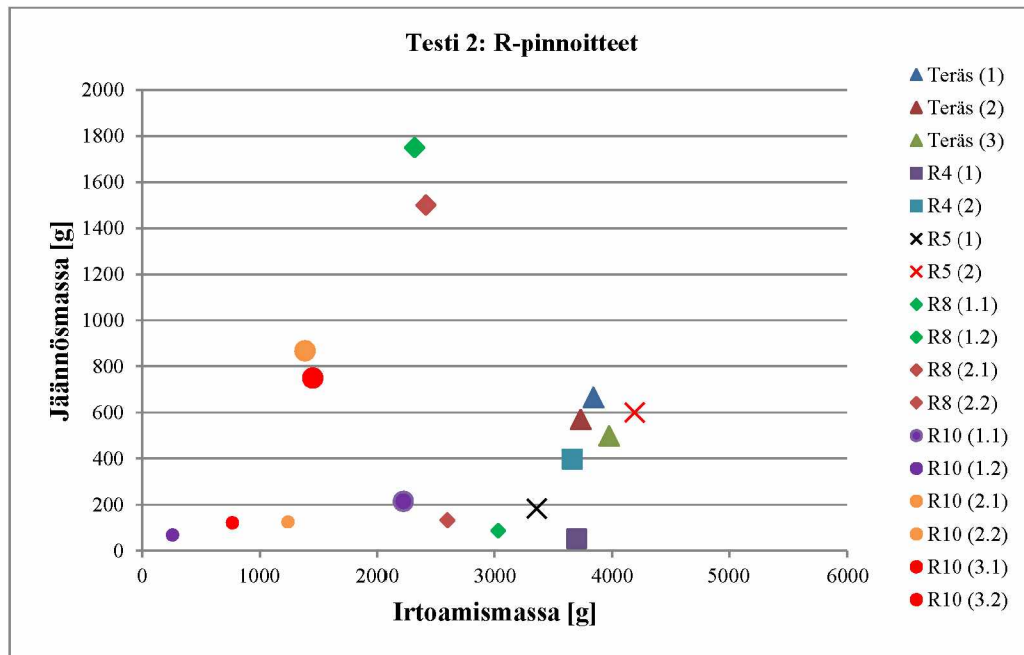
Mittaus	1. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]	2. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]
1.	3110	65	-	-
2.	3060	80	-	-
3.	-	-	-	-



Kuva 40. Pinnoite N: mittaukset 1 ja 2.

#### 6.2.4 R-pinnoitteet

Kuvassa 41 on esitetty R-pinnoitteiden jäännösmassat irtoamismassan funktiona. Taulukossa 15 on esitetty pinnoite R4:lle tehtyjen adheesiokokeiden tulokset. Kuvassa 42 on esitetty kuvat koekappaleesta adheesiotestin jälkeen. Ensimmäisessä mittauksessa käytännössä kaikki lumi irtosi rajapinnasta, mutta mittausta ei ole heti keskeytetty ja lunta on ehtinyt kertyä uudestaan koekappaleeseen. Toisessa mittauksessa lumi irtosi osittain pinnoitteen ja lumen rajapinnasta, mutta suurelta osin kuitenkin kohesiivisesti.



Kuva 41. Lumen jäännösmassa irtoamismassan funktiona R-pinnoitteilla. Sekundääriset irtoamiset vastaavalla värillä ja pienemmällä merkillä.

Taulukko 15. Pinnoite R4: irtoamis- ja jäännösmassat.

Mittaus	1. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]	2. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]
1.	3690	60	-	-
2.	3660	400	-	-
3.	-	-	-	-



Kuva 42. Pinnoite R4: mittaukset 1 ja 2.

Pinnoitteella R5 mittaustulokset erosivat varsin paljon toisistaan, mittaus 1:n loppu-tulos oli pinnoittamatonta teräslevyä parempi ja vastaavasti mittauksessa 2 hieman huonompi. Lumen murtumiset molemmilla pinnoitteilla olivat yhdistelmä kohesiivisesta ja rajapinnassa tapahtuneesta murtumisesta. Toisessa mittauksessa koekappale irtosi osittain magneettikiinnityksestä. Taulukossa 16 on esitetty adheesiokokeiden tulokset ja kuvassa 43 mittausten jälkeiset valokuvat.

*Taulukko 16. Pinnoite R5: irtoamis- ja jäännösmassat.*

Mittaus	1. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]	2. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]
1.	3360	180	-	-
2.	4210	600	-	-
3.	-	-	-	-



*Kuva 43. Pinnoite R5: mittaukset 1 ja 2.*

Taulukossa 17 on esitetty pinnoite R8:lle tehtyjen adheesiomittausten tulokset. Kuvassa 44 on esitetty R8-pinnoitteen adheesiotestin mittausten loppukuvat. Lumi murtui molemmissa mittauksissa ensimmäisen kerran, kun massat olivat 2220 g ja 2420 g ja toisen kerran, kun massat olivat 3030 g ja 2600 g. Murtuminen tapahtui molemmissa tapauksissa rajapinnassa tai hyvin lähellä sitä ja mittausten lopussa koekappaleissa oli vain vähän lunta kiinnittyneenä.

*Taulukko 17. Pinnoite R8: irtoamis- ja jäännösmassat.*

Mittaus	1. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]	2. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]
1.	2220	1750	3030	90
2.	2420	1500	2600	130
3.	-	-	-	-





Kuva 44. Pinnoite R8: mittaukset 1 ja 2.

Kuten R8:n tapauksessa, lumen irtoaminen R10-pinnoitteesta tapahtui kahdessa osassa (taulukko 18). Kuvassa 45 on koekappale mittauksissa 1 ja 2. Mittauksessa 1 lumi irtosi rajapinnasta 2220 g massalla ja koekappaleeseen jäi 220 g lunta, joka irtosi hetkeä myöhemmin. Myös mittauksissa 2 ja 3 lumi irtosi kahdessa vaiheessa ja huomattavasti aiemmin kuin pinnoittamalla teräslevyllä (noin 1400 g). Ensimmäisessä vaiheessa jäännösmassat olivat 800 g:n molemmin puolin ja toisen vaiheen jälkeen mittauksien lopussa koekappaleessa oli noin 120 g lunta kiinnittyneenä.

Taulukko 18. Pinnoite R10: irtoamis- ja jäännösmassat.

Mittaus	1. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]	2. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]
1.	2220	220	260	70
2.	1390	870	1240	130
3.	1450	750	770	120



Kuva 45. Pinnoite R10: mittaukset 1 ja 2. Keskimmäisessä kuvassa koekappale on kuvattu toisen mittauksen ensimmäisen pudotuksen jälkeen ja oikean puoleisessa kuvassa viimeisen pudotuksen jälkeen.

## 7 Koetulosten analysointi

Paras pinnoite olisi sellainen, mikä kokonaan estäisi lumen tarttumisen. Hyvä pinnoite myös vähentäisi lumen ja pinnoitteen välistä adheesiota, jolloin lumi putoaisi alustarakenteista mm. jarrutuksista ja kiihdytyksistä aiheutuneista voimista. Testi 1:llä mitattiin pinnoitteen vaikutusta lumen kertymisnopeuteen ja testi 2:lla lumen ja pinnoitteen välistä adheesiota, eli pinnoitteen ja pinnoittamattoman teräksen eroa massassa, millä lumi irtoaa sen oman painon aiheuttamasta kuormasta.

### 7.1 Testi 1: tulosten analysointi

Kuvissa 23–26 on esitetty testi 1:n tärkeimmät tulokset. Mittauksien mittausepävarmuus oli  $\pm 10$  %. Pinnoitteet jotka vähensivät lumen tarttumista verrattaessa pinnoittamattomaan teräslevyyn, ovat kuvissa 23–26 olevat merkit punaisen viivan alapuolella. Nämä pinnoitteet ovat:

- R4 [-15,5 %],
- M7 [-12,7 %],
- M3 [-12,4 %],
- A5 [-10,8 %] ja
- R7 [-10,6 %].

Edellä mainitut pinnoitteet vähensivät lumen tarttumista. Mikään pinnoite ei kuitenkaan estänyt lumen tarttumista kokonaan tai alentanut kertymisnopeutta hyvin merkittävässä määrin lukuun ottamatta pinnoite R4:ää. Tulokset olivat hyvin lähellä mittauksien mittausepävarmuutta. Ajoviiman vaikutus puuttui testeistä ja sen vaikutus voi olla todellisuudessa myös osittain puhdistava. Pinnoitteilla on kyky vähentää lumen tarttumista vain silloin, kun pinnoitetta on vielä esillä. Lumen peittäessä pinnoitteen lumen kertymisnopeus oli kaikilla pinnoitteilla käytännössä sama.

Osaan pinnoitteista lunta kertyi nopeammin kuin pinnoittamattomaan teräslevyyn. Nämä pinnoitteet olivat:

- R10 [+17,9 %],
- R3 [+11,2 %],
- N [+9,9 %],
- A2 [+9,4 %] ja
- R2 [+9,3 %].

Pinnoitteet N, A2 ja R2 eivät ylitä 10 % mittausepävarmuuden rajaa, mutta ovat hyvin lähellä sitä ja ovat sen vuoksi esitetty tässä. Pinnoite R10:llä oli testissä yksi korkeimmista kertymisnopeuksista. Erikoista tässä oli se, että pinnoite R10:stä lumi kuitenkin irtosi kaikista pienimmällä massalla testi 2:ssa. Pinnoite R10 tuntui käsin koettamalla tahmealta ja lunta oli vaikea pyyhkiä koekappaleen pinnalta pois. Lunta jäi helposti ohut kalvo pinnoitteen pinnalle, jos lunta pyyhki pois kädellä tai harjalla.

## 7.2 Testi 2: tulosten analysointi

Lumi irtosi pinnoite R10:n pinnalta kaikista pienimmällä massalla. Ensimmäiset lumen irtoamiset tapahtuivat massoilla 2230 g, 1390 g ja 1450 g keskiarvon ollessa 1690 g, mikä oli 43,9 % teräksen keskiarvosta. Kaikissa kolmessa R10:n mittauksessa lumi irtosi kahdessa osassa. Toiseksi pienimmät irtoamismassa olivat pinnoite M1:llä. Irtoamismassat olivat 1780 g, 2410 g ja 2010 g keskiarvon ollessa 2070 g. Tämä oli 53,7 % pinnoittamattomaan teräkseen kertyneen lumen massasta. Samoin kuin pinnoite R10:llä, pinnoite M1:llä lumi irtosi kahdessa osassa kaikissa mittauksissa. Kolmanneksi pienimmät irtoamismassa olivat pinnoite R8:lla. Irtoamismassat olivat 2220 g ja 2420 g ja keskiarvo 2320 g, mikä oli 60,3 % teräksen keskiarvosta. Myös R8:n mittauksissa lumi irtosi koekappaleesta kahdessa osassa. Taulukossa 19 on esitetty pinnoitteiden R10, M1 ja R8 irtoamismassat ja jäännöspainot. Pinnoitteilla R10, M1 ja R8 lumen irtoaminen tapahtui kahdessa osassa, kun kaikilla muilla pinnoitteilla lumi irtosi tai murtui yhdellä kertaa.

*Taulukko 19. Pinnoitteiden R10, M1 ja R8 irtoamis- ja jäännösmassat.*

Mittaus	1. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]	2. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]
R10:n 1.	2230	220	260	70
R10:n 2.	1390	870	1240	130
R10:n 3.	1450	750	770	120
M1:n 1.	1780	1190	2570	480
M1:n 2.	2410	73	-	-
M1:n 3.	2010	960	1570	300
R8:n 1.	2220	1750	3030	90
R8:n 2.	2420	1500	2600	130

Pinnoite R10:n mittauksissa toinen lumen irtoaminen tapahtui melkein heti ensimmäisen pudotuksen jälkeen. Toisessa mittauksessa lunta kertyi 370 g lisää, kun ensimmäisessä ja kolmannessa mittauksessa lunta oli tarvinnut kertyä lisää vain 40 g ja 20 g. Muilla pinnoitteilla vaadittiin huomattavasti enemmän lisää lunta ennen kuin lumi tippui uudestaan (M1: 610 g ja 1380 g; R8: 1100 g ja 1280 g). Kuvassa 46 on esitetty pinnoite R10 läheltä kuvattuna.



Kuva 46. Pinnoite R10:n lähikuva.

Pinnoite M9:n irtoamismassat olivat 2730 g ja 2700 g ja keskiarvo 2715 g. Tämä on 70,6 % teräksen keskiarvosta. Pinnoite N irtoamismassan arvot olivat 3110 g, 3060 g ja keskiarvo 3085 g. Tämä on 80,2 % teräksen keskiarvosta. Näillä pinnoitteilla lumen irtoaminen tapahtui yhdellä kertaa ja koekappale tuli käytännössä täysin puhtaaksi lumesta irtoamisen jälkeen.

A-pinnoitteilla oli suuremmat irtoamismassojen keskiarvot kuin teräksellä. Suurin irtoamismassan keskiarvo oli A2-pinnoitteella: 5410 g. Kertyneet lumen massat olivat niin suuret, että levy irtosi magneettikiinnityksestä molemmissa mittauksilla. Toiseksi suurimmat irtoamismassa olivat A7-pinnoitteella, jonka keskiarvo oli 4500 g, kolmanneksi suurin keskiarvo oli pinnoitteella A5 (4360 g) ja neljänneksi suurin pinnoitteella A3 (4230 g). Taulukossa 20 on esitetty A-pinnoitteiden irtoamis- ja jäännösmassat. A-pinnoitteiden tapauksessa lumi irtosi yleensä koheisiivisesti murtumalla teräksen tapaan, mutta suuremmalla massalla. Lisäksi A-pinnoitteiden mittauksissa oli suurta hajontaa irtoamismassoissa. Suuremmat irtoamismassat eivät johtuneet koelaitteistosta. Pinnoite M1:n ja pinnoittamattoman teräksen kolmannet mittaukset suoritettiin A2-pinnoitteen mittauksien jälkeen tämän varmistamiseksi. Saadut tulokset viittaavat siihen, että lumen koostumukseen ja koheisiivisiin voimiin vaikuttavat myös pinnan ominaisuudet mihin lumi kertyy. Vaikuttavia ominaisuuksia voivat olla mm. pinnankarheus ja pintaenergia.

Taulukko 20. Pinnoitteiden A2, A7, A5 ja A3 irtoamis- ja jäännösmassat.

Mittaus	1. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]	2. pudotus [g]	Jäännösmassa [g]
A2:n 1.	5430	230	-	-
A2:n 2.	5390	530	-	-
A7:n 1.	3860	660	-	-
A7:n 2.	5140	840	-	-
A5:n 1.	4990	160	-	-
A5:n 2.	3300	590	-	-
A5:n 3.	4780	450	-	-
A3:n 1.	4850	1100	-	-
A3:n 2.	4000	620	-	-
A3:n 3.	3850	590	-	-

## 8 Yhteenveto

Tutkimuksessa suoritettiin kaksi erilaista testiä pinnoitetuille ja pinnoittamille koekappaleille. Ensimmäisessä testissä mitattiin lumen kertymisnopeutta lyhyellä testillä. Toisessa testissä koekappaletta suihkutettiin lumella niin kauan kunnes lumen massan paino joko tiputti tai mursi lumen irti.

Ensimmäisessä testissä erot pinnoitteiden välillä olivat hyvin pieniä, eikä yksikään materiaaleista estänyt lumen kertymistä koekappaleeseen. Tämän vuoksi mittaustulokset olivat lähellä pinnoittamattoman teräksen keskimääräistä vertailuarvoa ja testin mittausepävarmuuden ( $\pm 10\%$ ) myötä varsinaista paremmuusjärjestystä pinnoitteille ei voinut määrittää. Viisi pinnoitetta hidasti lumen kertymistä, mutta hyvin vähän. Lumen kertymisen estävä pinnoite olisi asettunut selvästi mittausepävarmuuksien ulkopuolelle mitä ei testissä tapahtunut, joten voidaan todeta, etteivät testatut materiaalit estä lumen kertymistä.

Toisessa testissä lumi irtosi kaikista pienimmällä massalla pinnoite R10:stä, minkä irtoamismassojen keskiarvoksi mitattiin 1690 g (2230 g, 1390 g ja 1450 g). Toiseksi pienin irtoamismassa oli pinnoite M1:llä (keskiarvo 2070 g) ja kolmanneksi pienin R8:lla (keskiarvo 2320 g). Pinnoittamattomalla teräksellä keskiarvo oli 3850 g. Adheesiokokeiden mittausepävarmuus oli  $\pm 0,4\%$ . Edellä mainitut irtoamismassat olivat ensimmäiset lumen irtoamiset ja kaikilla pinnoitteilla lumi irtosi kahdessa osassa. Kahdella osalla tarkoitetaan sitä, että koekappaleeseen kertynyt lumi irtosi levyltä pystysuunnassa kahdessa osassa. Tutkimuksen muilla pinnoitteilla lumi irtosi tai murtui yhdessä osassa. Testin perusteella voidaan todeta pinnoitteiden alentavan rajapintojen välisiä adheesiovoimia merkittävästi verrattuna pinnoittamattomaan teräkseen.

Testi 2:ssa saatiin kylmäkeraamisilla pinnoitteilla (A-pinnoitteet) suurempia murtumis- ja irtoamismassoja kuin vertailuteräksellä. Lumen kohesiiviset voimat olivat suurempia silloin, kun lunta oli kertynyt kylmäkeraamilla pinnoitettuun koekappaleeseen kuin silloin kun lunta oli kertynyt pinnoittamattomaan teräkseen. Toisaalta taas R10-, M1- ja R8 -pinnoitteiden mittauksissa kohesiiviset voimat olivat todennäköisesti pienempiä koska lumi, irrotessaan vain osittain levyltä, oli samalla murtunut myös kohesiivisesti. Lumen adheesiovoima esimerkiksi R10:n mittauksissa on ollut pieni, koska lumi oli pudonnut jo hyvin pienellä massalla. Kohesiivisen voiman ollessa sama kuin esimerkiksi teräksien mittauksissa, alhainen adheesiovoima lumen ja pinnoitteen välillä olisi edesauttanut lumen irtoamista yhdessä osassa. Mittauksissa kävi kuitenkin toisinpäin. Tätä kannattaa tutkia lisää, sillä ei ole tarkkaa tietoa mitkä pinnan tai materiaalin ominaisuudet tai mahdolliset muut syyt tähän vaikuttavat.

## 9 Jatkotutkimukset

Pinnoitteita tulee testata käytännön kokeilla todellisissa ympäristöolosuhteissa. Tutkituista pinnoitteista on perusteltua ottaa käytännön kokeisiin erityisesti adheesiokokeessa hyviä tuloksia saavuttaneet M- ja R-pinnoitteet. Kokeellisten menetelmien tuloksien todentamiseksi ja vertailukohdaksi on oleellista valita myös pinnoitteita, joilla lumen irtoamismassat olivat pinnoittamatonta terästä suuremmat. Kokeita varten tulisi valita esimerkiksi yksi juna, jonka kokoonpano ei merkittävästi muuttuisi. Testejä varten voitaisiin esimerkiksi pinnoittaa yhdellä pinnoitteella yhden vaunun alustarakenteet tai joitain tiettyjä rakenneosia. Vaihtoehtoisesti voitaisiin käyttää pinnoitettuja teräslevyjä, jos alustarakenteissa on soveltua kiinnityspaikkoja. Pinnoitettujen vaunujen ollessa samanlaiset ja samassa junassa peräkkäin olisivat olosuhteet mahdollisimman samanlaiset ja pinnoitteiden vertailu luotettavaa. Pinnoitteiden testaamiseksi junakalustossa laaditaan tutkimussuunnitelma, jossa yhteistyössä radanpitäjän, operaattorin ja materiaalitoimittajien kanssa valikoidut pinnoitteet testataan todellisissa olosuhteissa.

Kylmälaboratorion kylmäkaappi ja lumitykki soveltuvat myös lukemattomille uusille tutkimuskohteille, sillä vastaavia koejärjestelyjä joissa pystytään tuottamaan erilaisia lumityyppejä, jäätä ja erittäin alhaisia lämpötiloja, on hyvin harvassa. Rautatieliikenteen puolelta on mahdollista tutkia lumen ja jään vaikutuksia useilla osa-alueilla. Laboratorio soveltuu niin liikkuvan kalustoon kuin ratainfrastruktuuriin liittyvien komponenttien kylmätestaukseen. Esimerkiksi useiden kaluston komponenttien, vaihteiden lumisuojiin tai RFID-lukijoiden ja -tagien toiminta lumisuihkussa voisivat soveltua tutkimuskohteiksi.

Raskaan kaluston ja työkonien puolella on vastaavasti lukuisia sovelluksia, joiden kylmätestaus laboratorioissa olisi mahdollista. Lumen ja jään kertymisen estäminen sekä raskaaseen että työkonikalustoon on yhtälailla tärkeää kuin rautatiekalustosta tapauksessa. Kertynyt lumi ja jää ovat pois hyötykuormasta, rikkovat komponentteja ja vaikeuttavat huoltoja. Myös esimerkiksi hydraulikan ja pneumatiikan kestävyys erittäin alhaisissa lämpötiloissa on ongelma, joiden testaukselle konelaboratorioissa on valmiudet.



## Lähteet

- Hefny R, Kollár L.E, Farzaneh M & Peyrard C (2009) Adhesion of Wet Snow to Different Cable Surfaces. 13th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, 8–11th September 2009, Andermatt, Switzerland.
- Jellinek (1960) Adhesive properties of ice, part II. Research report 62. Wilmette, Illinois: U.S. Army Snow and Ice Permafrost Research Establishment.
- Liikennevirasto (2010) Talvi 2009–2010 Suomen rautateillä - tapahtumat ja johtopäätökset. Helsinki: Liikennevirasto.
- Liikennevirasto (2012) Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 4: Vaihteet. Liikenneviraston ohjeita 22/2012. Helsinki: Liikennevirasto.
- Mizuno Y & Wakahama G (1983) Experimental studies on snow accretion at subzero temperatures. International Glaciological Society, Annals of Glaciology 4.
- Oksanen T (1999) Suomen lumipeitteen alueellinen vaihtelu. Pro gradu-tutkielma. Helsingin yliopisto, Geofysiikan laitos.
- Rasmus S (2005) Snow pack structure characteristics in Finland – measurements and modeling. Report series in geophysics No. 48. University of Helsinki, Division of geophysics.
- RIL (2001) Lumirakenteiden suunnittelu- ja rakentamishjeet (RIL 218-2001). Helsinki, Suomen rakennusinsinöörien liitto.
- Sakakibara D, Nakamura Y, Kawashima K & Miura S (2007) Experimental Result for Snow Accretion Characteristics of Communications Cable. 56th IWCS Conference: Proceedings of the International Wire & Cable Symposium (IWCS), Florida, USA.
- Shapiro L.H, Johnson J.B, Sturm M & Blaisdell G.L (1997) Snow mechanics. Review of the State of Knowledge and Applications. US Army Corps of Engineers, CRREL Report 97-3, 08/1997.
- Summer S.L, Riegler B, Thomaier R & Hoover K (2004) A Silicone-Based Ice-Phobic Coating for Aircraft. USA, NuSil Silicone Technology.
- USACE (2006) Engineering and Design: Ice Engineering. Manual No. 1110-2-1612. U.S. Army Corps of Engineers. Washington, USA.

# Koekappaleen spesifikaatiot pinnoitevalmistajille

## KOEKAPPALEEN SPESIFIKAATIOT

Kylmälaboratoriossa suoritettavien kokeiden tarkoituksena on vertailla eri pinnoitteiden tai muiden vastaavien aineiden vaikutusta lumen ja jään kertymisen estämiseksi. Vertailun tasapuolisuuden ja kokeiden toistettavuuden kannalta on tärkeää, että koeparametrit ovat kokeissa samat.

### Mitat ja muoto

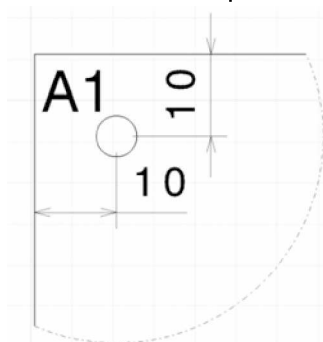
Koekappaleena on 400 x 400 mm kokoinen teräslevy, jonka paksuus on 1 mm. Teräslevyn reunat ja kulmat tulee olla siistityt, niin että koekappaletta on turvallista käsitellä. Koekappaleen jokaiseen kulmaan tulee porata halkaisijaltaan 5 mm reikä 10 mm päähän reunoista (kuva 1).

### Materiaali ja pinnankarheus

Koekappaleen materiaaliksi soveltuu tavallinen rakenneteräs. Koekappaleen lujuudelle ei ole asetettu erityisiä vaatimuksia. Koekappaleen pinnankarheus tulee olla tavalisen valssatun teräksen tasoa, jolloin  $R_a$ -arvo on yleensä 0,5–2,0  $\mu\text{m}$ . Teräslevyssä ei saa olla painaumuksia, kolhuja tai muita vaurioita ja pinnan tulee olla silmämääräisesti tasalaatuista. Koekappaletta ei saa kiillottaa.

### Koekappaleiden merkintä

Koekappaleet tulee merkitä kirjaimella ja juoksevilla numerolla. Merkintä tulee tehdä yhteen koekappaleen kulmaan, niin että merkintä tulee reiän ja kulman väliseen tilaan (kuva 1). Merkinnän voi tehdä esimerkiksi piirtopuikolla raaputtamalla tai stanssaamalla. Merkinnän tulee olla selkeä, mutta liiallisen syviä jälkiä tulee välttää. Merkintä tulee tehdä ennen pinnoitusta.



Kuva 1. Reiän sijainti ja koekappaleen merkintä.

### Pinnoite

Koekappaleen pinnoittaminen tulee tehdä teräslevyn kaikille pinnoille. Koekappale voidaan ripustaa kulmien rei'istä pinnoittamisen helpottamiseksi. Käytetyistä pinnoitteista tulee esittää listaus, mistä pinnoitteen tyyppin ja muut tiedot voi tarkastaa juoksevan numeron avulla.

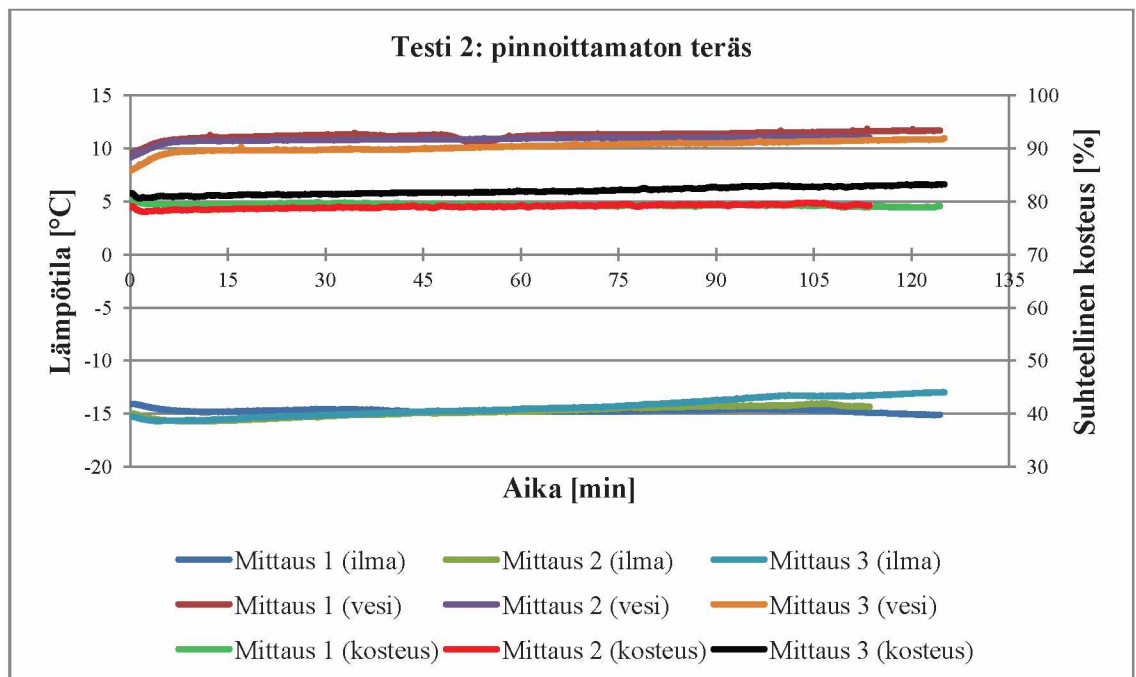
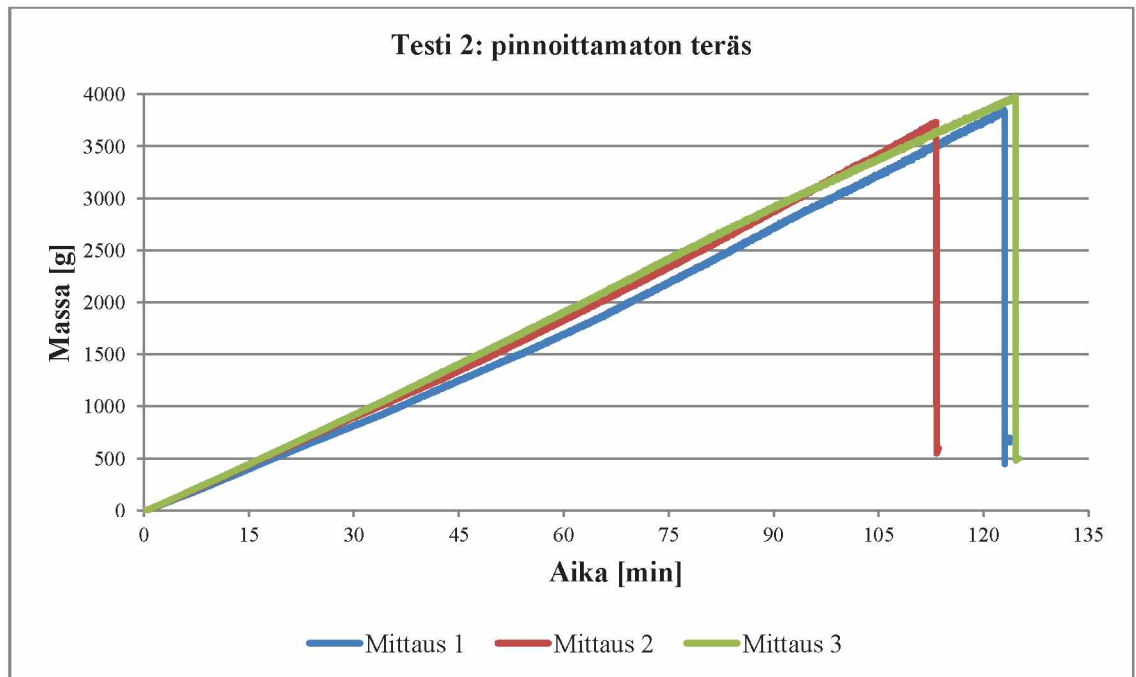
## Alu-Releco Oy:n pinnoitteiden spesifikaatiot ja pinnoitusmenetelmän kuvaus.

Alu-Releco, pinnoite koodi	Merkintä koodi ( R )	Valmistus lämpötila	Pinnoite paksuus
AR-107 PTFE.	R 1.	+220° C	20 – 30µm
AR-112 PTFE.	R 2.	+220° C	40 – 60µm
AR-116 PTFE.	R 3.	+400° C	20 – 30µm
AR-121 PTFE.	R 4.	+420° C	20 – 30µm
AR-140 PEEK.	R 5.	+400° C	60 – 80µm
AR-211 FEP.	R 6.	+350° C	60 – 80µm
AR-226 PFA.	R 7.	+360° C	60 – 80µm
AR-321 ETFE.	R 8.	+300° C	200 – 250µm
AR-420 Polyamidi	R 9.	+230° C	80 – 100µm
AR-550 CeraFlon. +PTFE	R 10.	+20 – 100° C	80 – 100µm

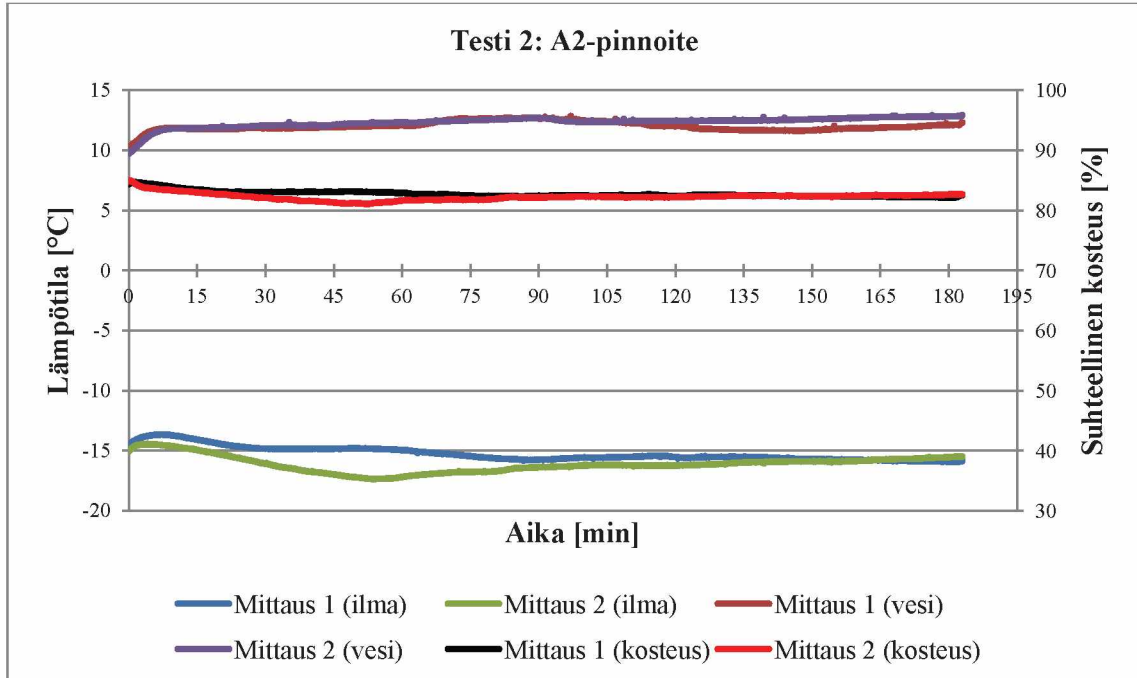
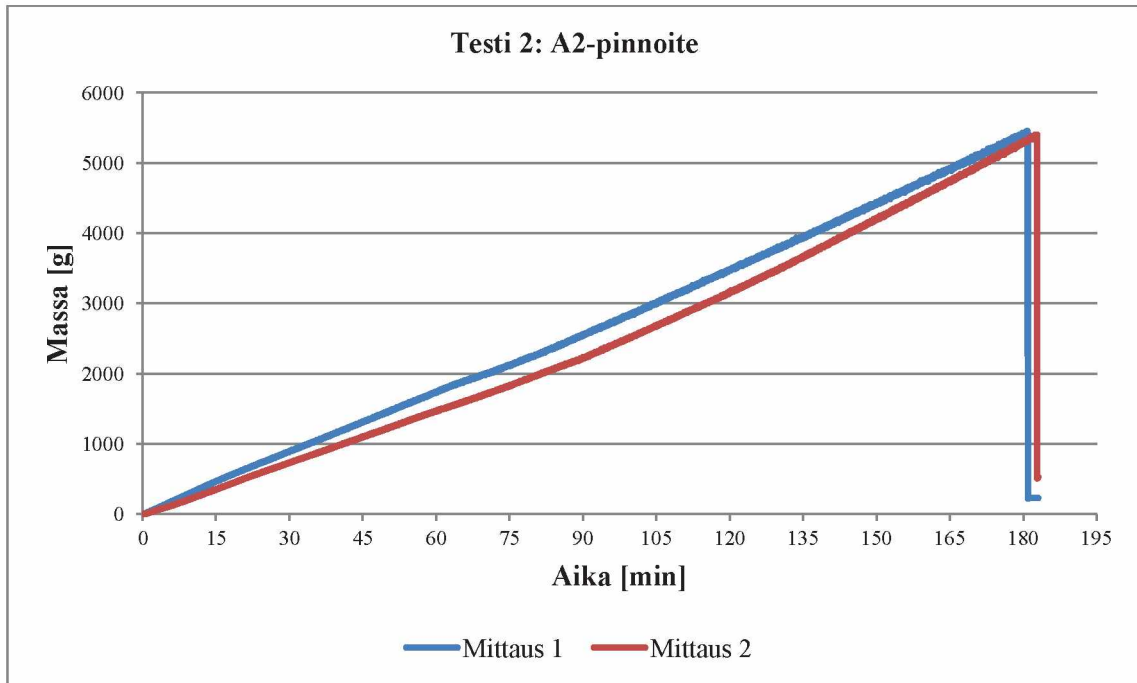
### Työn kuvaus.

- kappaleen esikuumennus n.+400°C lämmössä.
- kevyt alumiini oksidi suihkupuuhdistus RA 1,5-3.
- AR- pinnoitus.
- pinnoitteen polymerisointi tarvittavassa lämpötilassa.
- pinnoitteen paksuus mitta.

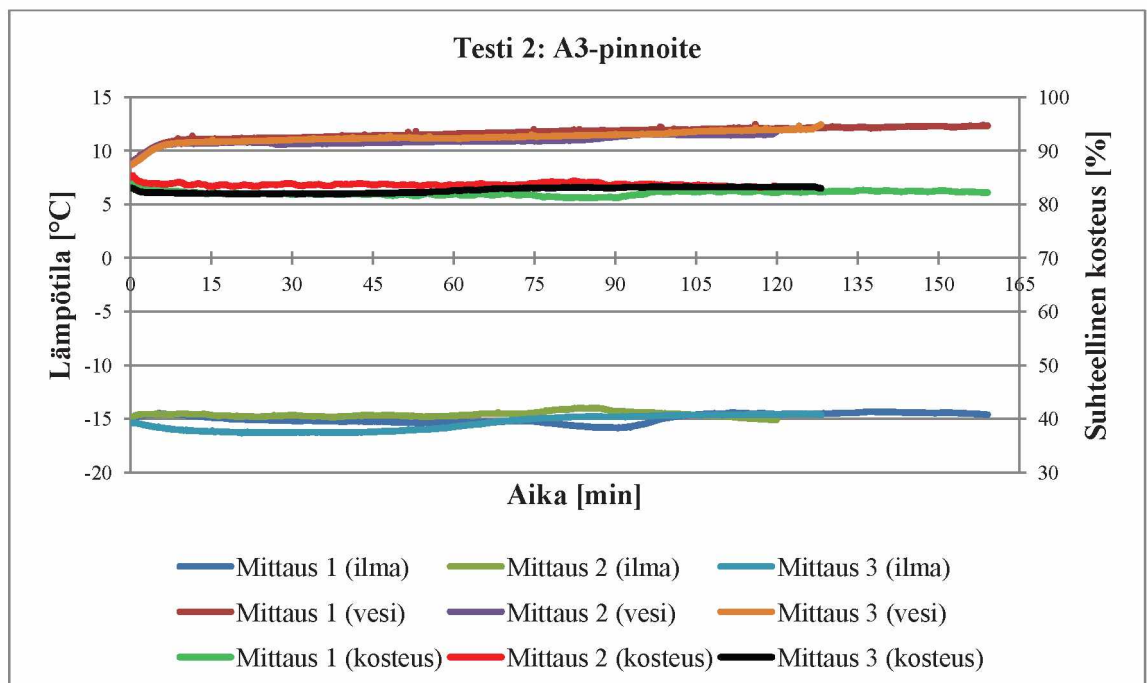
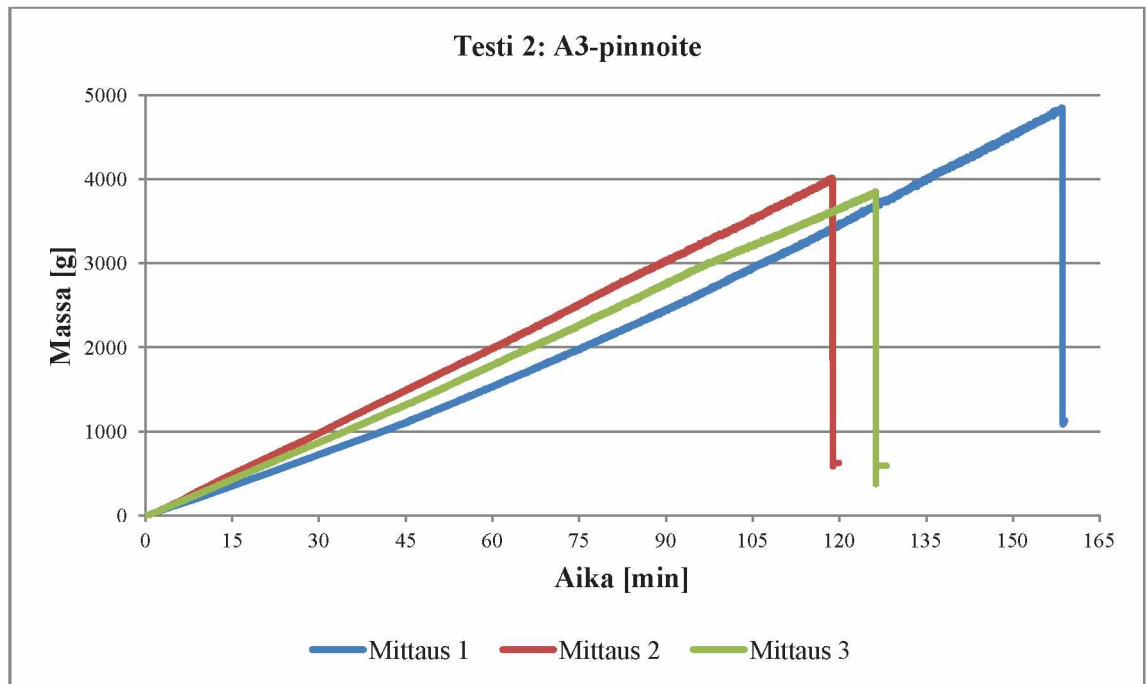
## Testi 2 pinnoittamattomalle teräkselle



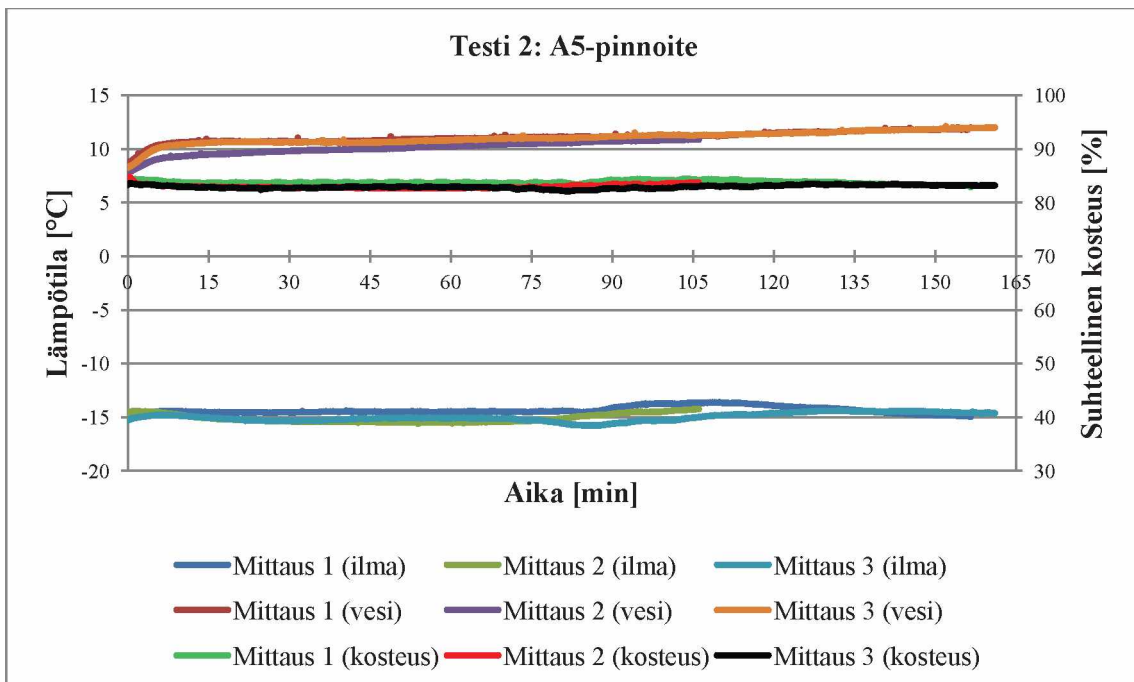
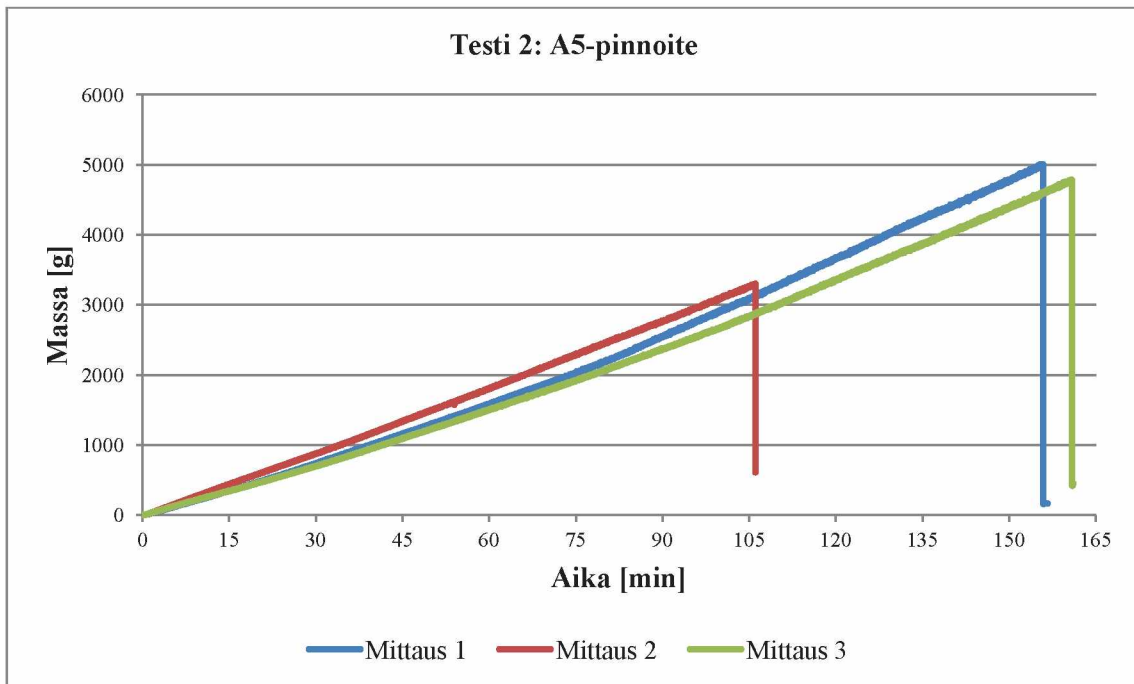
## Testi 2 pinnoitteella A2



## Testi 2 pinnoitteella A3

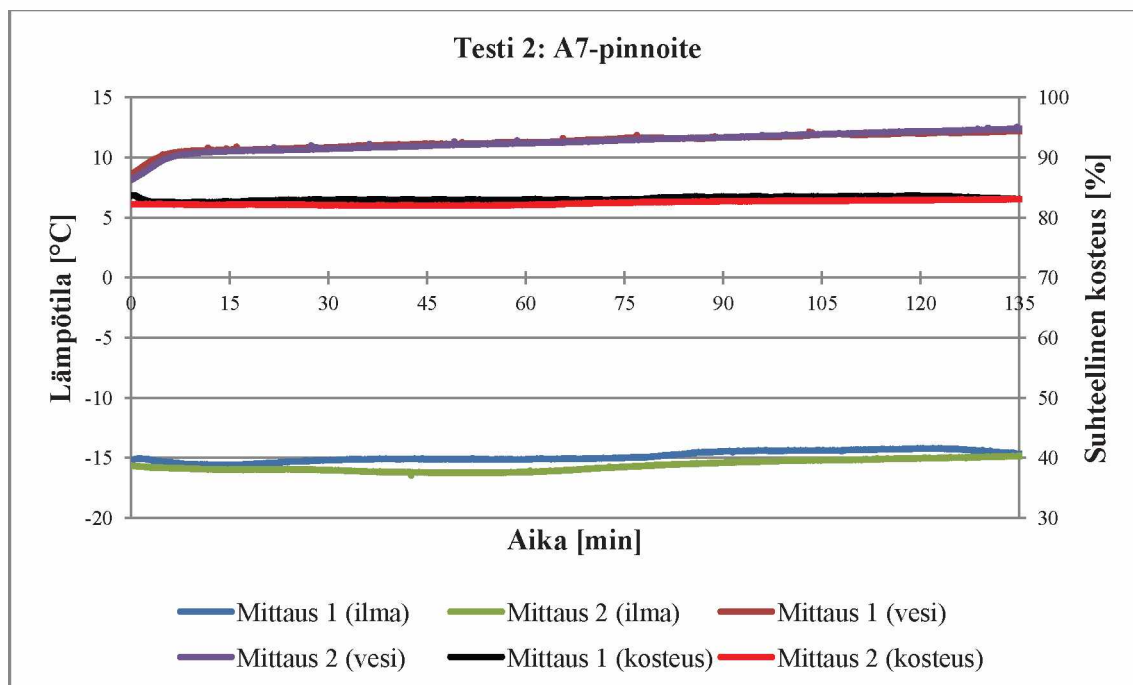
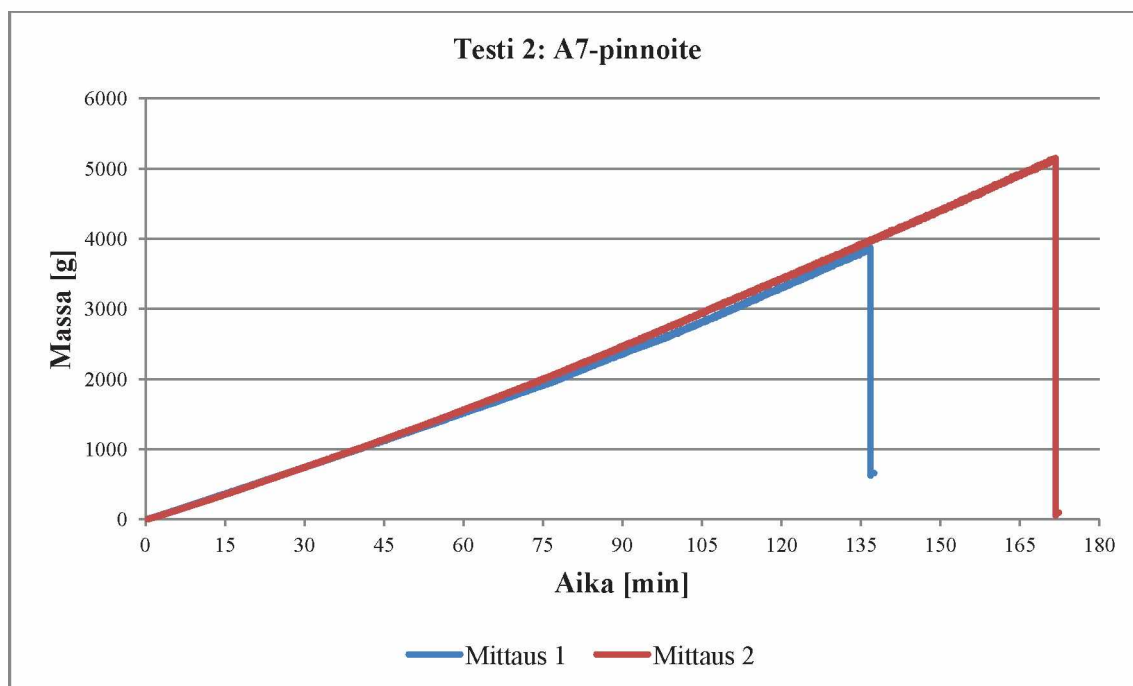


## Testi 2 pinnoitteella A5

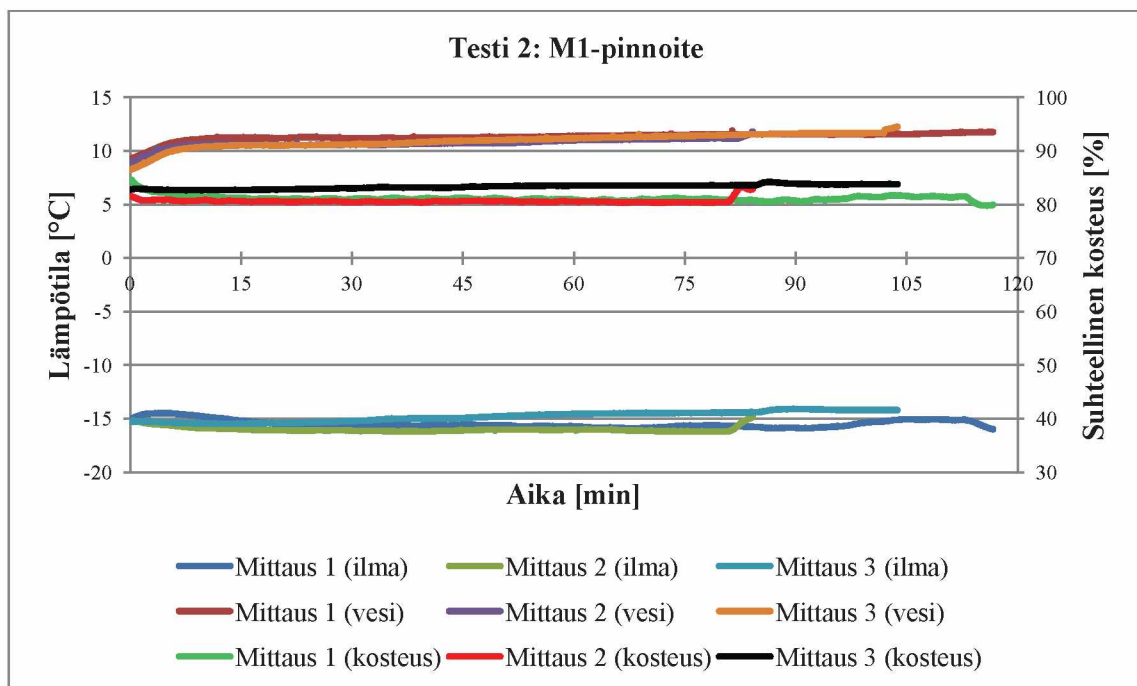
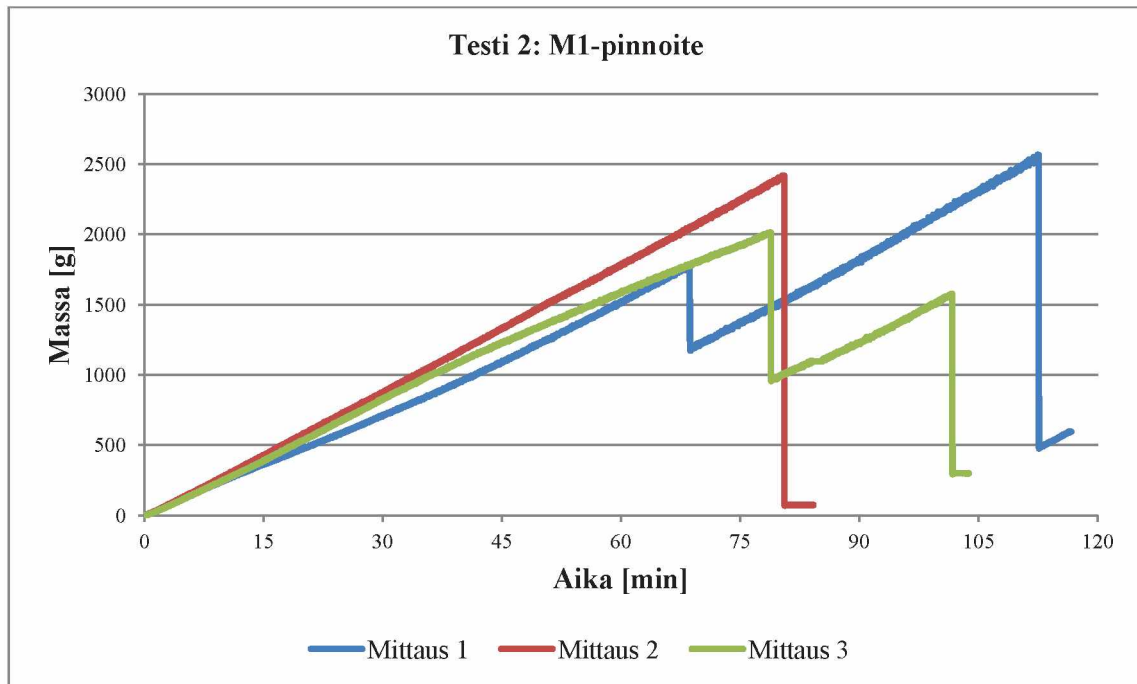




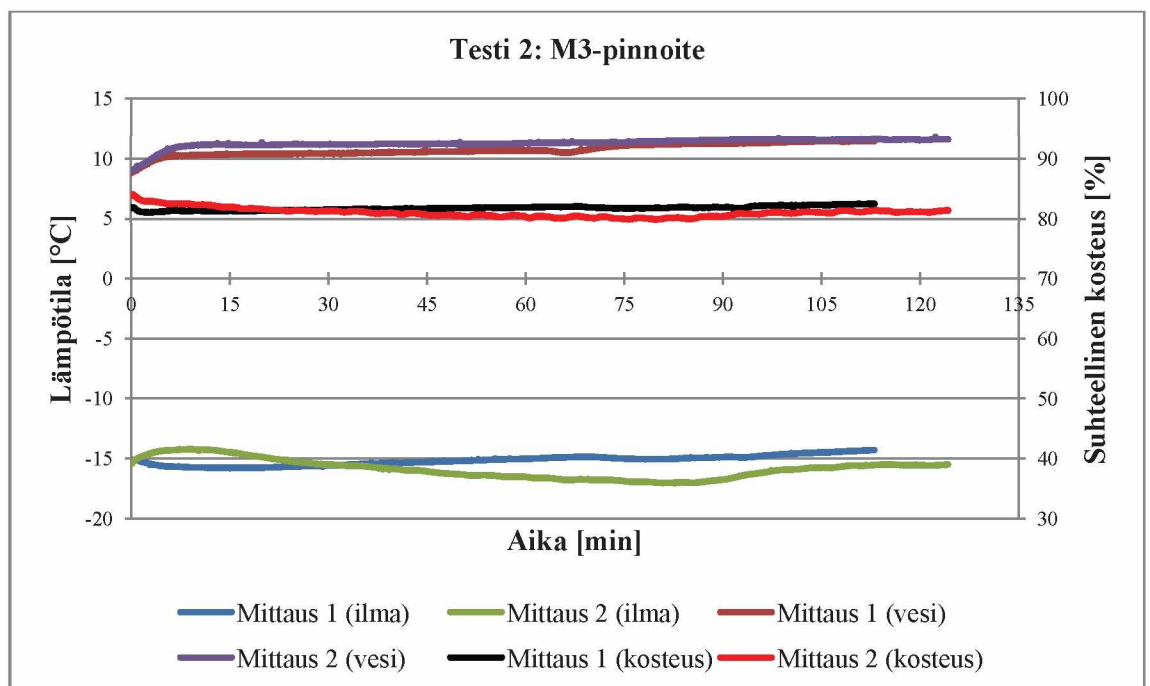
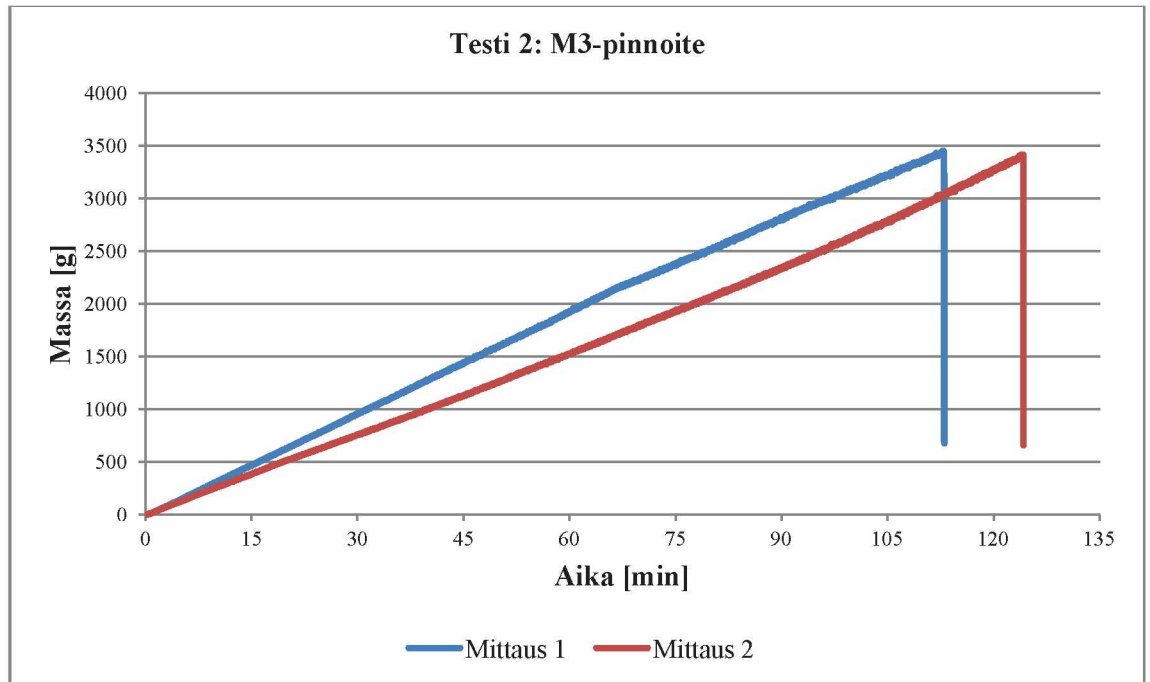
## Testi 2 pinnoitteella A7



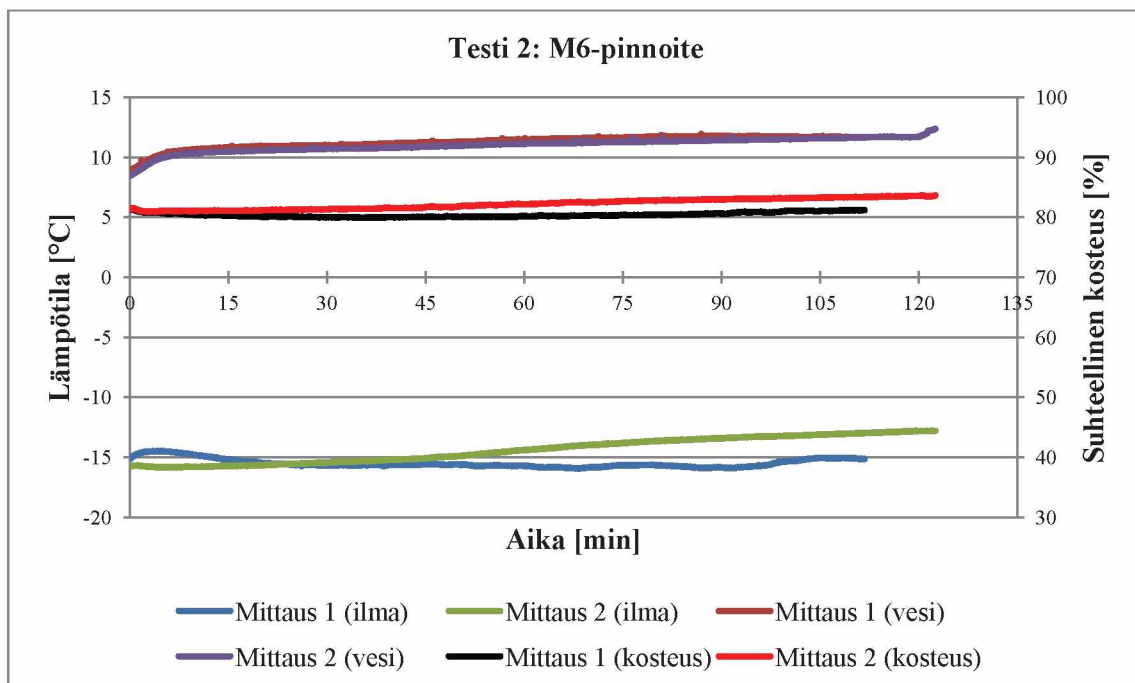
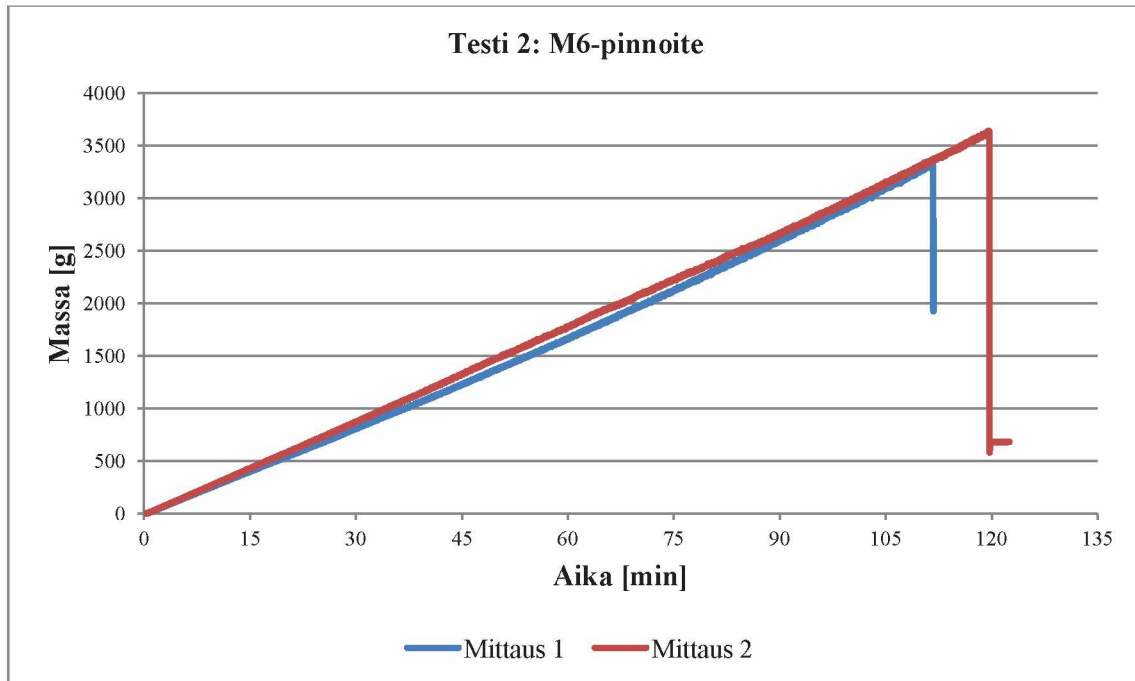
## Testi 2 pinnoitteella M1



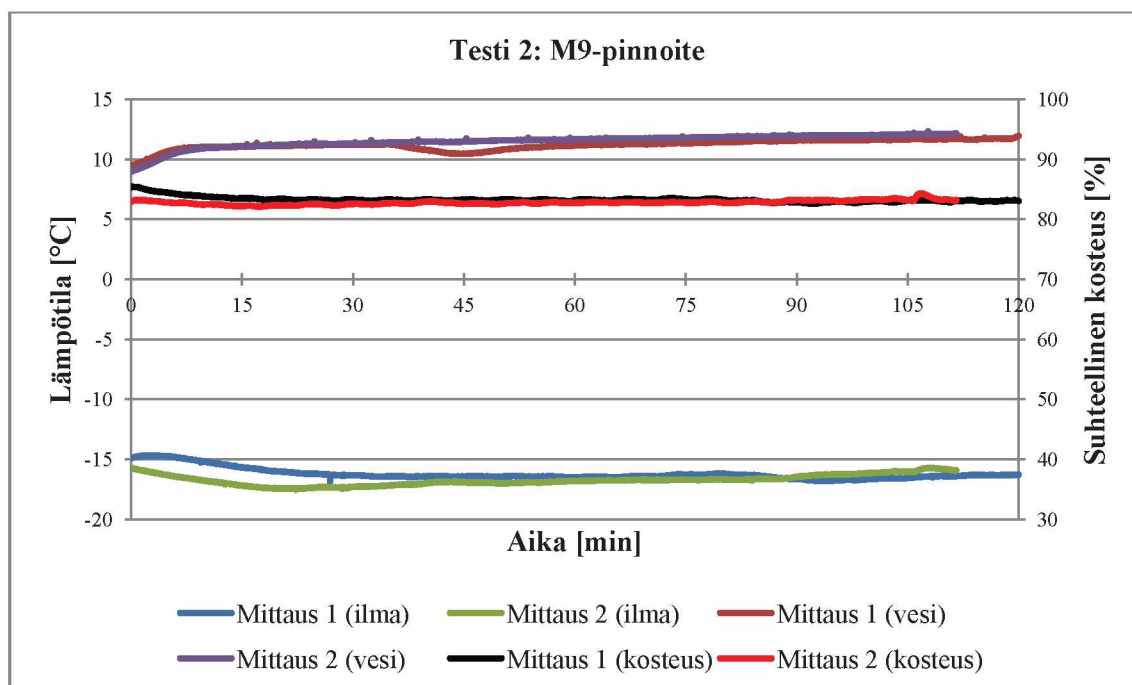
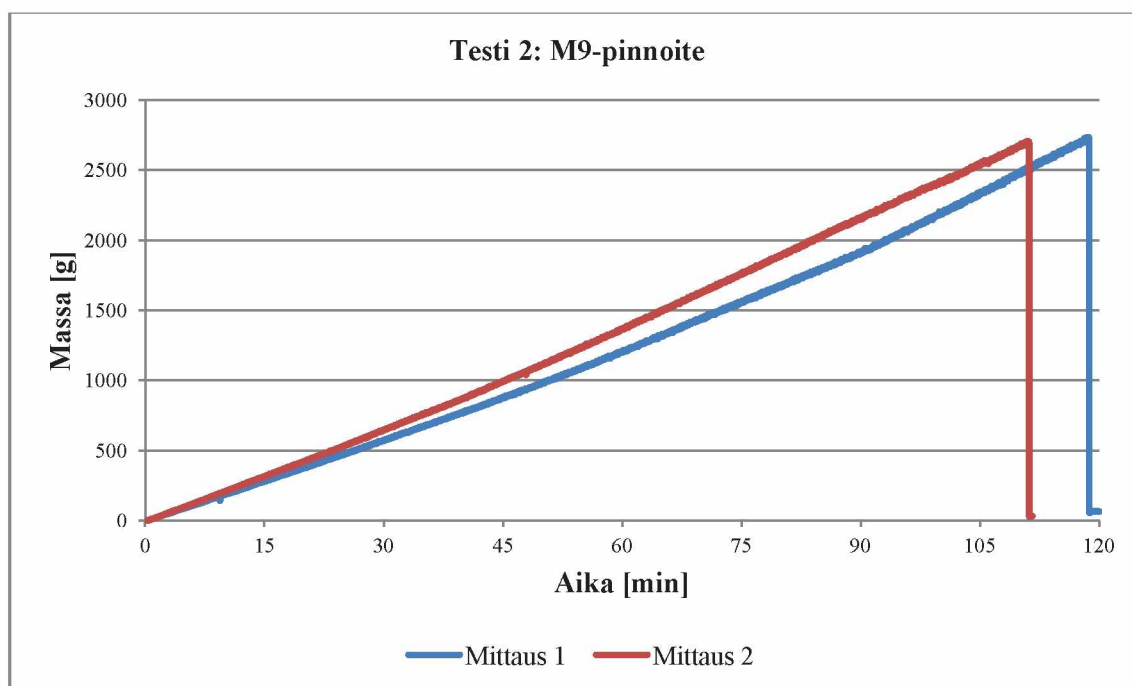
## Testi 2 pinnoitteella M3



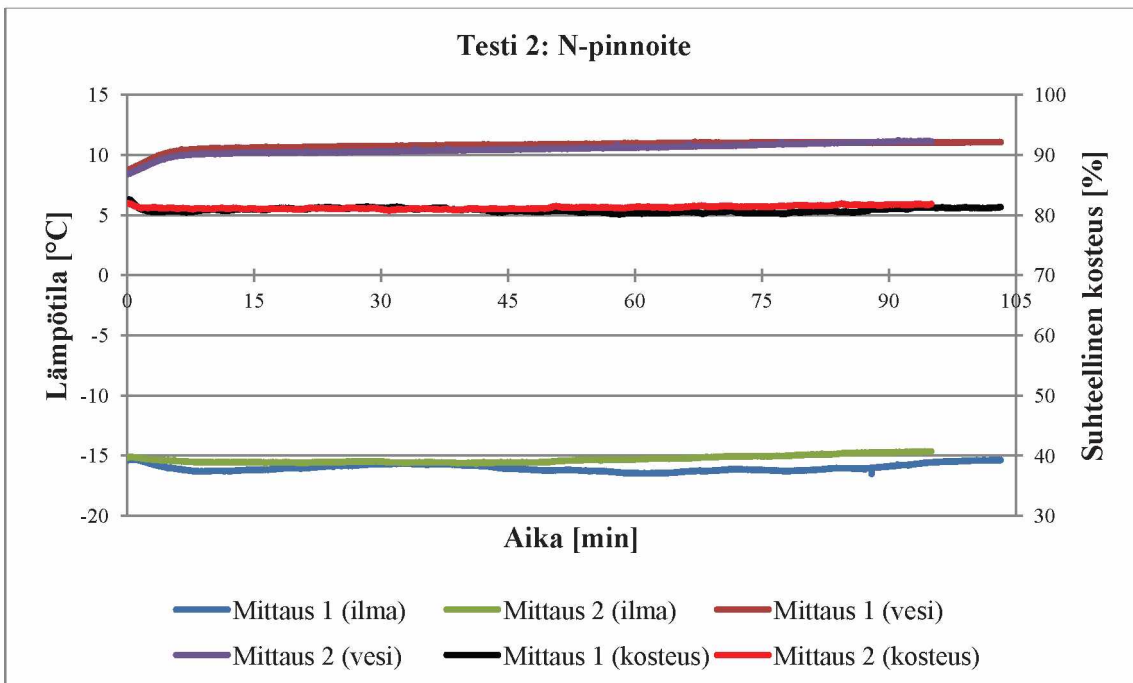
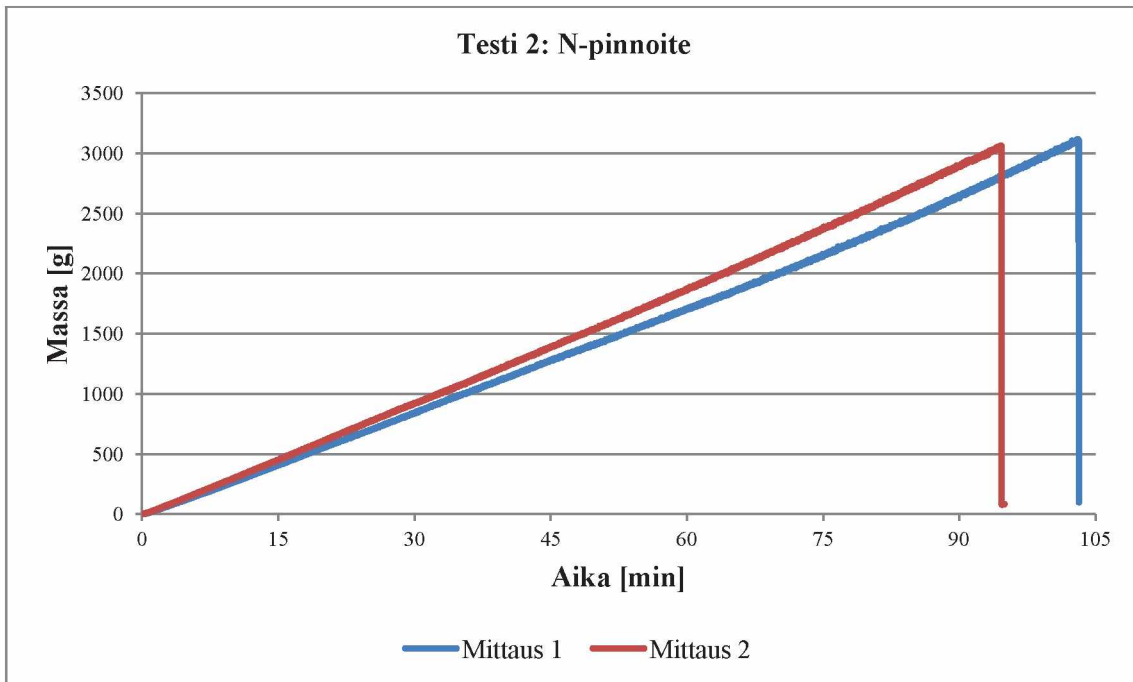
## Testi 2 pinnoitteella M6



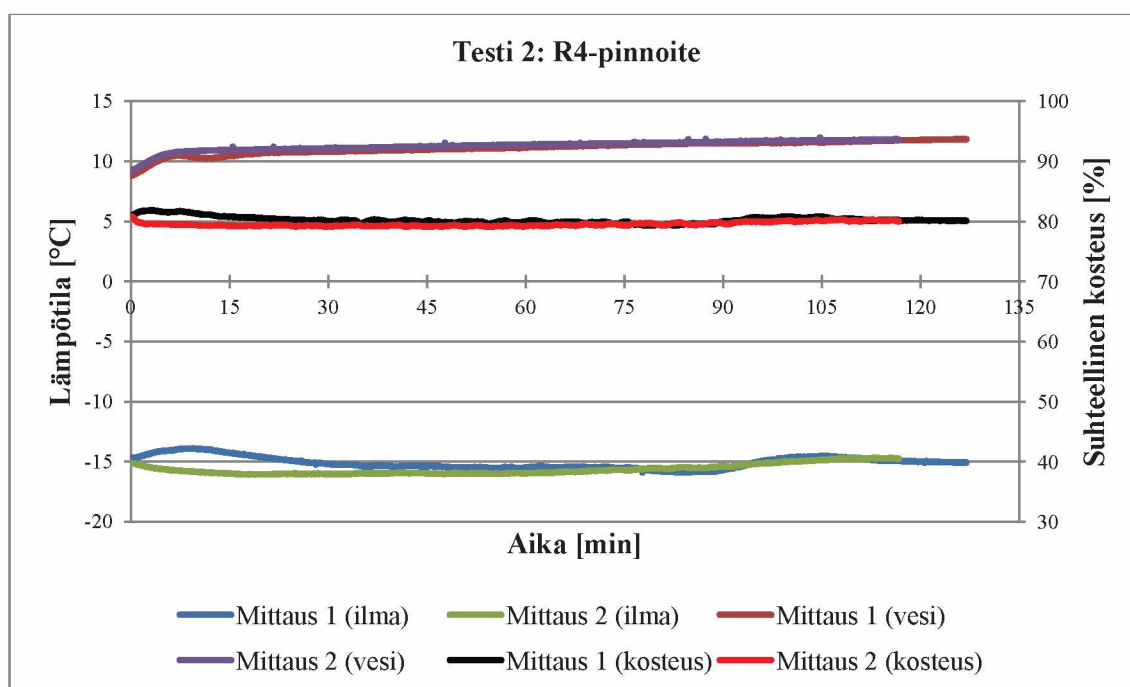
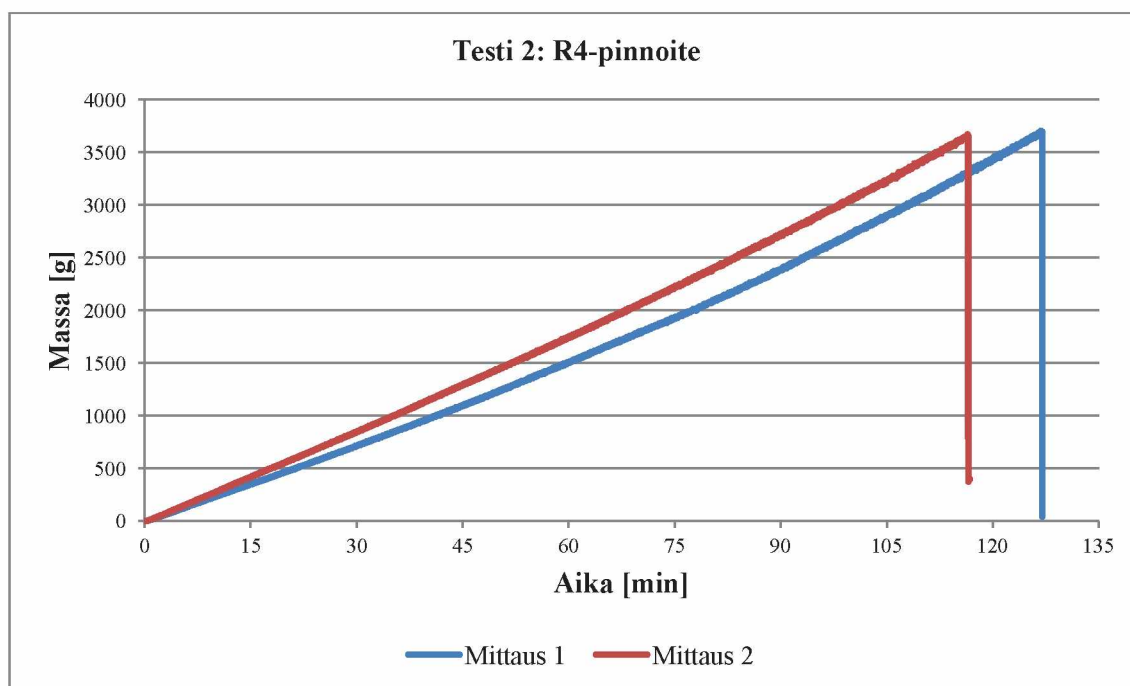
## Testi 2 pinnoitteella M9



## Testi 2 pinnoitteella N

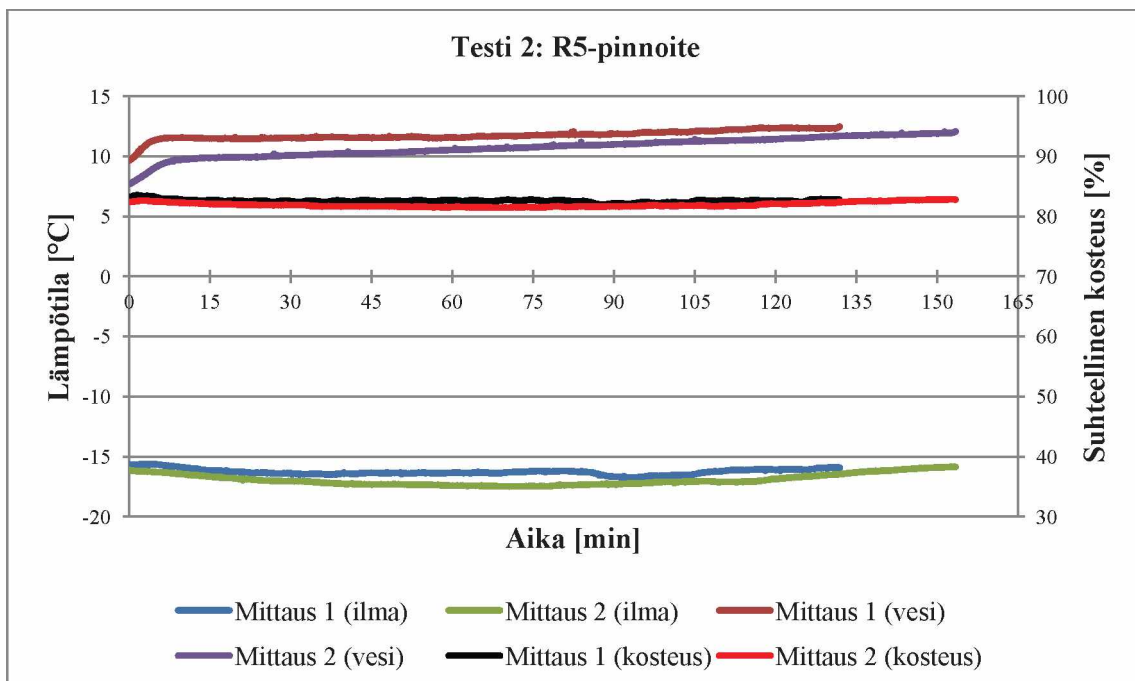
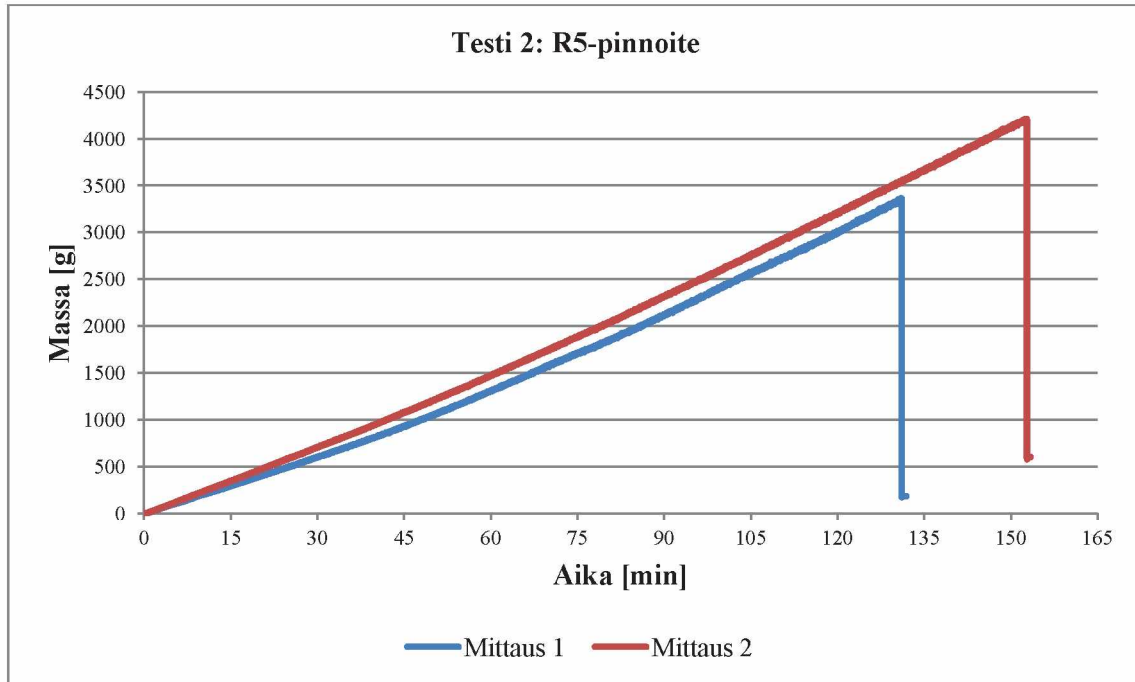


## Testi 2 pinnoitteella R4

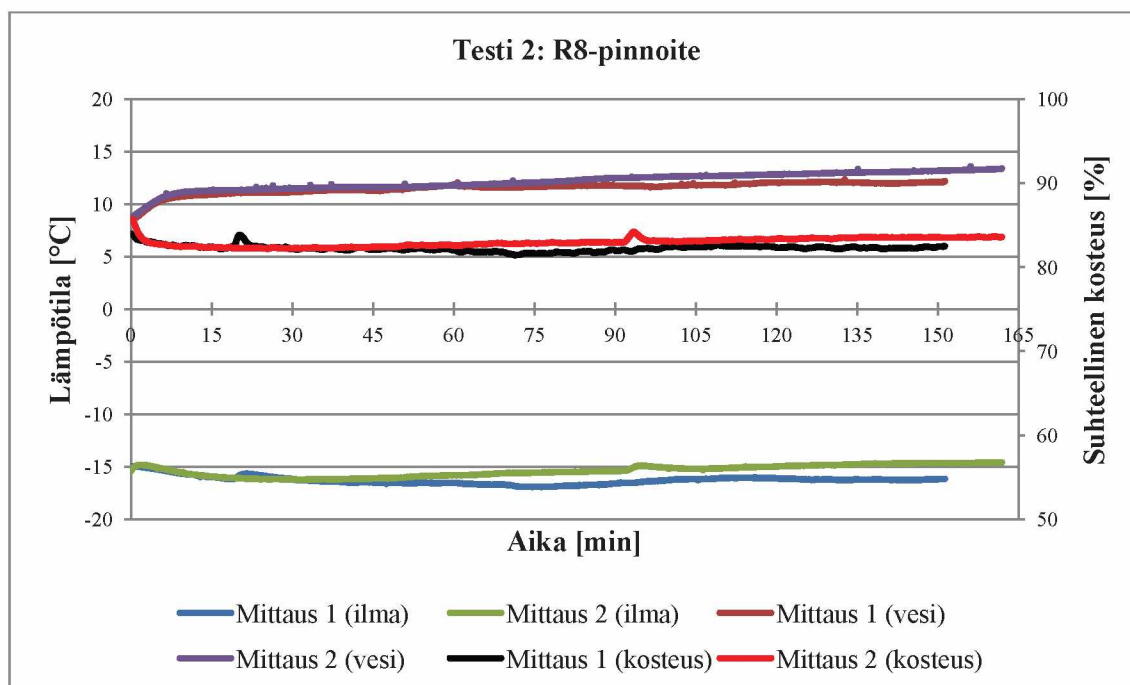
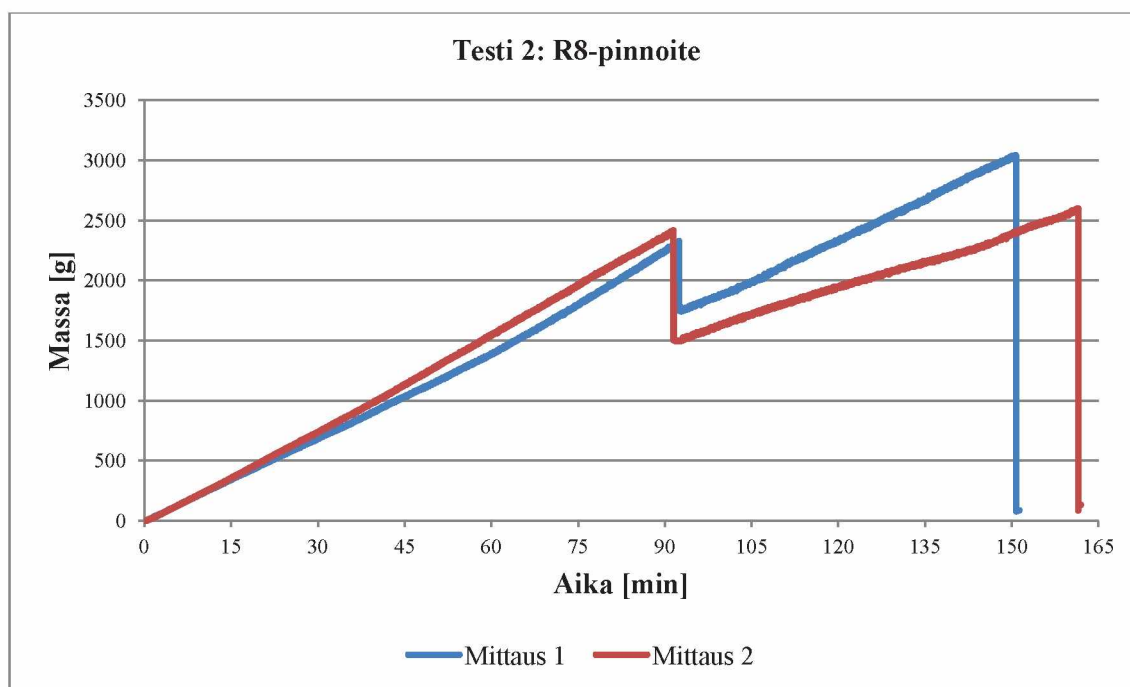




## Testi 2 pinnoitteella R5



## Testi 2 pinnoitteella R8



## Testi 2 pinnoitteella R10

